

SCHNEESCHMELZ-ABFLUSSSIMULATIONEN BASIEREND AUF SCHNEEFLÄCHENBESTIMMUNGEN MIT DIGITALEN LANDSAT- MSS- UND NOAA/AVHRR-DATEN

INAUGURAL-DISSERTATION

zur Erlangung der Philosophischen Doktorwürde
vorgelegt der
Philosophischen Fakultät II
der Universität Zürich

von
MICHAEL F. BAUMGARTNER
von Solothurn und Oensingen

Begutachtet von Herrn Prof. Dr. H. Haefner
und Herrn Prof. Dr. K.I. Itten

Zürich 1987
Zentralstelle der Studentenschaft



SCHNEESCHMELZ-ABFLUSSSIMULATIONEN BASIEREND AUF SCHNEEFLÄCHENBESTIMMUNGEN MIT DIGITALEN LANDSAT - MSS- UND NOAA/AVHRR-DATEN

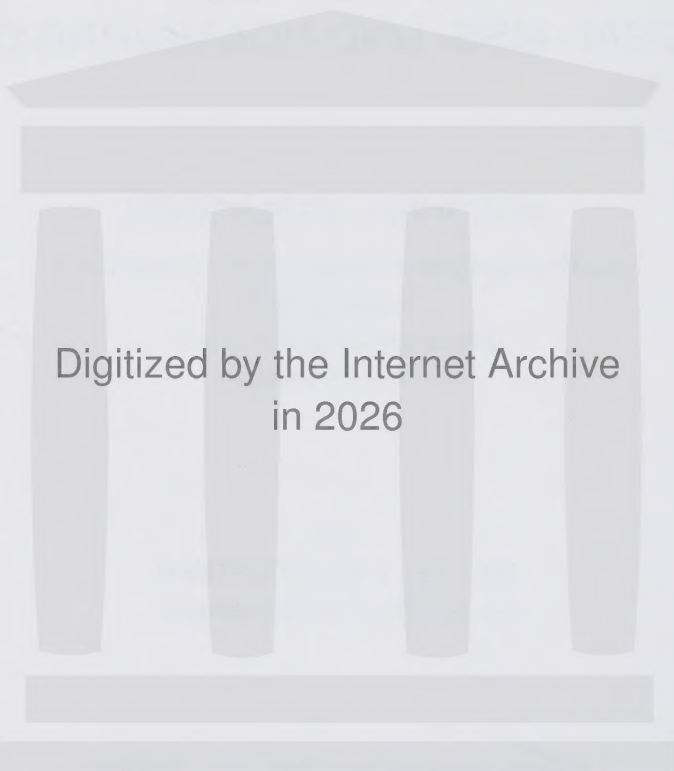
INAUGURAL-DISSERTATION

zur Erlangung der Philosophischen Doktorwürde
vorgelegt der
Philosophischen Fakultät II
der Universität Zürich

von
MICHAEL F. BAUMGARTNER
von Solothurn und Oensingen

Begutachtet von Herrn Prof. Dr. H. Haefner
und Herrn Prof. Dr. K.I. Itten

Zürich 1987
Zentralstelle der Studentenschaft



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41507227_0024

VORWORT

Die Erfassung der Ausdehnung und der zeitlichen Veränderung der saisonalen Schneedecke im Alpenraum stellen in der Gruppe Luftbildinterpretation und Fernerkundung am Geographischen Institut der Universität Zürich seit langem ein zentrales Untersuchungsgebiet dar. Die vorliegende Arbeit zeigt Schneeauswertungen mit zwei verschiedenen Sensorsystemen, basierend auf den hier entwickelten Interpretationsmethoden. Die Schneeflächenauswertungen werden für Schneeschmelz-Abflussimulationen verwendet, die durch die hier präsentierte Arbeit in einen präoperationellen Zustand getreten sind.

Bereits 1982/1983 (Diplomarbeit) und dann im Rahmen der Dissertation 1983-1986 hatte ich Gelegenheit, mich mit den vielfältigen Problemen der Fernerkundung zu beschäftigen. Die interdisziplinäre Zusammenarbeit mit dem Institut für Kommunikationstechnik der ETH Zürich (IKT) brachte besonders interessante und anregende Ideen.

Mein Dank geht zuerst an den "Nationalfonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung", der das Projekt "Verbesserung wasserwirtschaftlicher Vorhersagen in alpinen und subalpinen Einzugsgebieten durch Bestimmung der Schneebedeckung mittels Satellitenbildaufnahmen" finanzierte und mir ermöglichte, im Rahmen dieses Projekts die Dissertation durchzuführen.

Die Arbeit stand unter der Leitung von Herrn Prof. Dr. H. Haefner und Herrn Prof. Dr. K.I. Itten. Ihnen möchte ich für ihre Unterstützung und ihr Interesse danken.

Die vorliegende Arbeit konnte nur dank der Zusammenarbeit zwischen den beiden Instituten soweit gedeihen. An dieser Stelle möchte ich auch Herrn Prof. O. Kübler (IKT) für die Bereitschaft der Zusammenarbeit danken. Ohne das Zusammenwirken verschiedener Fachleute hätten viele Probleme nicht in so kurzer Zeit überwunden werden können.

Besonders Herr Dr. K. Seidel (IKT) leistete mir in vielen Bereichen wertvolle und selbstlose Hilfe. Er war jederzeit bereit, auf meine vielen Fragen

einzu-gehen und verstand es, in schwierigen Phasen des Projekts neue Anregungen zu geben. Dank seiner menschlichen Haltung ist für mich Vieles einfacher verlaufen. Ich möchte ihm an dieser Stelle ganz herzlich für seine grosszügige Hilfsbereitschaft und seinen Einsatz danken.

Ganz besonders möchte ich auch Herrn Dr. J. Martinec (Eidgenössisches Institut für Schnee- und Lawinenforschung, Weissfluhjoch-Davos) danken. Er hat es uns ermöglicht, mit dem von ihm erstellten Abflussmodell zu arbeiten. Zudem hat er die Modellparameter berechnet und uns zur Verfügung gestellt. Auch seine wertvolle Mithilfe bei der Einarbeitung in die Problematik des Modells und seine Betreuung bezüglich hydrologischer Fragestellungen trugen wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit bei.

Stark beansprucht habe ich auch die Zeit von Herrn Dr. M. Keller, der mich in die Schneeflächenbestimmung mittels Landsat-MSS-Daten einführte. Während vielen interessanten Diskussionen konnte ich von seiner grossen Erfahrung lernen, wodurch sich viele Arbeitsgänge vereinfachten.

Viele Anregungen erhielt ich auch von den Herren Dr. F. Ade, G. Gerig (beide IKT), Prof. Dr. H. Lang und Dr. L. Braun (beide Geographisches Institut der ETH Zürich), auch ihnen sei ganz herzlich gedankt.

Den Herren Dr. A. Rango (US Department of Agriculture, Hydrology Laboratory, Beltsville, MD) und E. Major (Research and Data Systems, Inc., Lanham, MD) bin ich zu besonderem Dank verpflichtet. Sie ermöglichten den Einsatz des Abflussmodells auf unserer Rechenanlage und berieten uns in programmtechnischer Hinsicht.

Danken möchte ich Herrn Gees von den Nordostschweizerischen Kraftwerken (NOK) und Herrn Stampach von den Elektrizitätswerken der Stadt Zürich (EWZ), die mir grosszügigerweise Daten der Reservoirmanipulationen lieferten.

Den Herren G. Nejedly (Geographisches Institut der Universität Bern) und Rattei (Deutsche Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt, Oberpfaffenhofen-München) danke ich herzlich für ihre Hilfe bei der Auswahl der NOAA/AVHRR-Daten.

Gedankt sei auch dem Militärflugdienst Dübendorf, der uns Luftbilder des Einzugsgebietes zur Verfügung stellte.

Der Bürgergemeinde der Stadt Solothurn (Fröhlicher-Stiftung) möchte ich für ihre Beteiligung an den Druckkosten danken.

In den Dank einschliessen möchte ich auch meine Eltern, die mir dieses Studium ermöglichten, sowie Renée Reck für ihr Verständnis.

Zollikon, im Mai 1987

Michael F. Baumgartner

INHALTSVERZEICHNIS

VORWORT

INHALTSVERZEICHNIS

1. EINLEITUNG	1
1.1. Schneeschmelz-Abflussimulationen aufgrund periodischer Schnee- flächenbestimmungen	1
1.2. Zielsetzung und Vorgehen	4
1.2.1. Problemstellung	4
1.2.2. Vorgehen	8
2. BEDEUTUNG DER RESSOURCE "WASSER" IM ALPINEN RAUM	11
2.1. Geographische Charakteristika mit Bezug auf den Wasserabfluss	11
2.1.1. Topographie	11
2.1.2. Klima	12
2.1.3. Der Wasserhaushalt in der Schweiz	13
2.1.4. Der Wasserkreislauf in einem alpinen Einzugsgebiet	14
2.1.5. Der Abfluss in den Schweizer Alpen	15
2.2. Hydroelektrizität in der Schweiz	20
2.2.1. Elektrizitätserzeugung	20
2.2.2. Kraftwerkanlagen und Verteiler-Netzwerk	21
2.2.3. Die Elektrizitätsnachfrage	22
3. DIE ERFASSUNG DER SCHNEEDECKE MIT METHODEN DER FERNERKUNDUNG	25
3.1. Physikalische Eigenschaften von Schnee	26
3.1.1. Die Entstehung von Schnee	26
3.1.2. Die Metamorphose von Schnee	27
3.1.2.1. Die Schneedichte	28
3.1.2.2. Energiehaushalt der Schneedecke	28
3.1.3. Spektrales Reflexionsverhalten von Schnee	31
3.1.4. Die saisonale Schneedecke	32
3.1.4.1. Schneeablagerung und Verteilung	32
3.1.4.2. Auf- und Abbau der Schneedecke	35
3.2. Landsat-MSS- und NOAA/AVHRR-Multispektraldaten zur Schneekartierung	38
3.2.1. Einführung	38
3.2.2. Eignung von Landsat-MSS- und NOAA/AVHRR-Daten zur Schneekartierung	39
3.2.2.1. Sensorvergleich	39
3.2.2.2. Aufnahmezyklus	43
3.2.3. Schneekartierungen mit Landsat-MSS- und NOAA/AVHRR-Daten	44
3.3. Methoden zur Verarbeitung digitaler Landsat-MSS- und NOAA/AVHRR- Daten	45
3.3.1. Möglichkeiten der digitalen Satellitenbildverarbeitung	46
3.3.2. Die Geokodierung	48
3.3.2.1. Geometrische Transformation von Landsat-MSS-Aufnahmen	49
3.3.2.2. Geometrische Transformation von NOAA/AVHRR-Aufnahmen	51
3.3.3. Multispektrale Klassifikation	52
3.3.3.1. Abgrenzung verschiedener Methoden	52
3.3.3.2. Verwendete Klassifikationsalgorithmen	53
3.3.4. Verwendete Hard- und Software	56
4. MODELLE ZUR SIMULATION DES SCHMELZWASSER-ABFLUSSES	59
4.1. Kalibrierungsmodelle	60

4.2. Deterministische Modelle	61
4.3. SRM - Ein deterministisches Schneeschmelz-Abfluss-Modell	63
4.3.1. Die Struktur des SRM's	64
4.3.2. Die weltweite Verwendung des Modells	66
4.3.3. Modellinput	67
4.3.3.1. Modellvariablen	68
4.3.3.2. Modellparameter	69
4.3.4. Handhabung des Modells und Genauigkeitsabschätzung	72
5. DAS EINZUGSGEBIET RHEIN-FELSBERG	75
5.1. Auswahlkriterien	75
5.2. Kurze geographische Charakterisierung	76
5.3. Klima	76
5.4. Meteorologische Stationen	79
5.5. Abflussregime	80
5.6. Manipulation des Abflusses	80
5.7. Schneeverhältnisse 1981/1982 und 1984/1985	82
6. BESTIMMUNG DER SCHNEEFLAECHEN MIT DIGITALEN LANDSAT-MSS- UND NOAA/AVHRR-DATEN	89
6.1. Auswahl von Fernerkundungsdaten	90
6.2. Geländemodell	91
6.3. Bodenkontrolle	93
6.4. Vorverarbeitung der Satellitendaten	94
6.4.1. Umformatieren	94
6.4.2. Korrektur von Daten- und Systemfehlern	95
6.4.3. Geokodierung	96
6.4.3.1. Transformation und Resampling von Landsat-MSS-Daten	97
6.4.3.2. Transformation und Resampling von NOAA/AVHRR-Daten	98
6.4.4. Mosaikieren von Landsat-MSS-Szenen	99
6.4.5. Erstellen digitaler Wolken- und Gebietsmasken	99
6.4.5.1. Wolkenmaskierung bei Landsat-MSS-Daten	99
6.4.5.2. Wolkenmaskierung bei NOAA/AVHRR-Daten	100
6.4.5.3. Gebietsmaske	102
6.5. Selektion von Merkmalen	102
6.6. Klassifikation: Ueberwachtes Lernen und multispektrales Zuordnen ..	102
6.6.1. Lernen	103
6.6.1.1. Klassifikationsschema	103
6.6.1.2. Stichprobenerhebung	105
6.6.1.3. Zuordnungskriterium	106
6.6.2. Zuordnen	108
6.7. Multivariater Datensatz	110
6.8. Auswertung von bewölkten Regionen und Restauration fehlender Bildteile	111
6.8.1. Modellgestützter Ansatz	112
6.8.2. Restauration durch Substitution	114
6.9. Genauigkeit der Schneekartierungen	115
6.9.1. Bodenkontrolle	115
6.9.2. Auflösungsvermögen und Klassifikationsgenauigkeit	117
6.10. Bestimmung der zeitlichen Veränderung der Schneedecke während der Ausaperungsperiode	119
6.10.1. Ableiten der Schneebedeckungskurven für 1982 und 1985	120
7. SCHNEESCHMELZ-ABFLUSSSIMULATIONEN	125
7.1. Modellinput für 1982 und 1985	125
7.1.1. Modellvariablen	125

7.1.2. Modellparameter	126
7.2. Abflusssimulation 1982	128
7.3. Simulationsvergleiche in Teilgebieten (1982)	132
7.4. Abflusssimulation 1985	136
7.4.1. Simulation basierend auf MSS-Auswertungen	137
7.4.2. Simulation basierend auf NOAA/AVHRR-Auswertungen	139
7.4.2.1. Simulation basierend auf drei Höhenzonen	139
7.4.2.2. Simulation basierend auf zwei Höhenzonen	144
7.4.2.3. Simulation basierend auf einer Höhenzone	147
7.5. Beurteilung von Schneekartierungen und Abflusssimulationen	149
8. AUSBLICK	151
8.1. Weiterentwicklung der Schneebedeckungskurven	151
8.2. Weitere Verwendungsmöglichkeit der Schneebedeckungskurven	153
8.3. Bessere Handhabung des Abflussmodells durch die Entwicklung eines Experten-Systems	155
8.4. Notwendige Verbesserungen	156
9. ZUSAMMENFASSUNG	159
SUMMARY	163
LITERATURVERZEICHNIS	167
ANHANG I:	173
ANHANG II:	186
ANHANG III:	188
ANHANG IV:	195

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 1 :	Summenkurven für Niederschlag und Abfluss im alpinen Einzugsgebiet Dischma (hydrologisches Jahr 1967)	16
Abb. 2 :	Elektrizitätserzeugung (oben) und Elektrizitätsverbrauch (unten) von schweizerischen Kraftwerken für ausgewählte Daten ...	18
Abb. 3 :	Spektrale Reflexionskurven für Neu- (a) und Altschnee (b)	31
Abb. 4 :	Abnahme der Albedo und Zunahme der Schneedichte in Funktion der Zeit	33
Abb. 5 :	Mittlerer monatlicher Anteil der als Schnee gefallenen Niederschläge für die Messstation Davos (1588m ü.M.)	34
Abb. 6 :	Mittlerer jährlicher Anteil der in den Alpen als Schnee gefallenen Niederschläge	34
Abb. 7 :	Ablagerung von 12 aufeinanderfolgenden Schneeschichten während der Akkumulation der Schneedecke (Weissfluhjoch, 2540m ü.M., 1973)	36
Abb. 8 :	Mittlere monatliche Höhe der Schneegrenze (a) und der 0°C-Isotherme (b) im Hinterrheintal	37
Abb. 9 :	Reliefabweichung (σ) in Funktion der räumlichen Sensorauflösung (R)	42
Abb. 10:	Geometrische Auflösung entlang einer Scanlinie mit (oben) und ohne Berücksichtigung (unten) der Erdkrümmung	52
Abb. 11:	Beispiel zum Maximum-Likelihood-Klassifikator (oben) und zum Mahalanobis-Distanz-Klassifikator (unten)	55
Abb. 12:	"Snowmelt Runoff Model": Schema der Eingabegrößen	68
Abb. 13:	Lage des Testgebietes, der meteorologische Stationen (°) und der Abflussmessstelle (→), Ausschnitt aus der Landeskarte 1:500'000	77
Abb. 14:	Verlauf des Wasserstandes (Pegel) bei Felsberg, 1982	83
Abb. 15:	Vergleich der gemessenen Abflussganglinie (mager) mit der Rekonstruktion des natürlichen Abflusses (fett)	85
Abb. 16:	Hypsographische Kurve und Einteilung des Einzugsgebiets Rhein-Felsberg in fünf Höhenstufen und die zugehörigen Flächen (A..E)	92
Abb. 17:	Spektrale Trennbarkeit von Wolken und Schnee mit NOAA/AVHRR-Daten	101
Abb. 18:	Variation der Subkategorien im Verlauf einer Ausaperungsperiode (Landsat-MSS, 1985)	107

Abb. 19:	Beispiel einer Schneebedeckungskarte (Rhein-Felsberg, 18. Mai 1982)	109
Abb. 20:	Relative Anzahl reiner Schneepixel (P) in Funktion der räumlichen Auflösung (R)	118
Abb. 21:	Schneebedeckungskurven (1982) für fünf Höhenzonen (A..E) basierend auf MSS- und AVHRR-Auswertungen (Rhein-Felsberg)	121
Abb. 22:	Schneebedeckungskurven (1985) für fünf Höhenzonen (A..E) basierend auf MSS- und AVHRR-Auswertungen (Rhein-Felsberg)	122
Abb. 23:	Abflussimulation 1982 (fett) im Vergleich mit dem gemessenen Abfluss (mager); Rhein-Felsberg	128
Abb. 24:	Abflussimulation 1982 (fett) im Vergleich mit dem natürlichen, rekonstruierten Abfluss (mager); Rhein-Felsberg	131
Abb. 25:	Schneebedeckungskurven (1982) für die Teilgebiete Vorderrhein/Ilanz (oben), Hinterrhein (Mitte) und Landwasser/Tiefencastel (unten) und fünf Höhenzonen (A..E)	134
Abb. 26:	Abflussimulation in drei Teilgebieten (1982)	135
Abb. 27:	Summe des simulierten Abflusses aus drei Teilgebieten (fett) verglichen mit dem simulierten Abfluss des ganzen Einzugsgebiets (mager); 1982	136
Abb. 28:	Abflussimulation 1985 basierend auf MSS-Auswertungen und fünf Höhenzonen (fett) im Vergleich mit dem natürlichen, rekonstruierten Abfluss (mager); Rhein-Felsberg	137
Abb. 29:	Schneebedeckungskurven (1982) für drei Höhenzonen (A', B', C') basierend auf AVHRR- und MSS-Auswertungen (Rhein-Felsberg) ...	141
Abb. 30:	Abflussimulation 1985 basierend auf NOAA/AVHRR-Auswertungen (fett) im Vergleich mit dem natürlichen, rekonstruierten Abfluss (mager); Rhein-Felsberg	143
Abb. 31:	Schneebedeckungskurven (1985) für zwei Höhenzonen (A'', B'') basierend auf AVHRR- und MSS-Auswertungen (Rhein-Felsberg) ...	145
Abb. 32:	Abflussimulation 1985 basierend auf NOAA/AVHRR-Auswertungen (fett) im Vergleich mit dem natürlichen, rekonstruierten Abfluss (mager); Rhein-Felsberg	146
Abb. 33:	Schneebedeckungskurven (1985) für eine Höhenzone basierend auf AVHRR- und MSS-Auswertungen (Rhein-Felsberg)	147
Abb. 34:	Abflussimulation 1985 basierend auf NOAA/AVHRR-Auswertungen (fett) im Vergleich mit dem natürlichen, rekonstruierten Abfluss (mager); Rhein-Felsberg	148
Abb. 35:	"Modifizierte Schneebedeckungskurven" (Typ III) für 1982 (oben) und 1985 (unten); Höhenzone C, Rhein-Felsberg	154



TABELLENVERZEICHNIS

Tab. 1 :	Technische Angaben zu den Systemen Landsat-MSS und NOAA/AVHRR	40
Tab. 2 :	Beispiele für Abflussimulationen mit dem "Snowmelt Runoff Model"	67
Tab. 3 :	Verwendete meteorologische Stationen	79
Tab. 4 :	Seefläche und Nutzinhalt der zur Korrektur verwendeten Speicherseen	81
Tab. 5 :	Verwendete Landsat-MSS- und NOAA/AVHRR-Daten (1982, 1985)	91
Tab. 6 :	Klassifikationsschema für Landsat-MSS-Daten	104
Tab. 7 :	Zuweisung der Videowerte in einem multivariaten Datensatz (MSS 1982)	111
Tab. 8 :	Einteilung des Digitalen Gelände-Modells in 205 Reliefklassen	112
Tab. 9 :	Relative Schneebedeckung [%] in fünf Höhenzonen und Bewölkungsgrad [%] (Rhein-Felsberg, 1982 und 1985)	115
Tab. 10:	Relative Bedeckung [%] der Schneeflächen, Uebergangszonen und aperen Flächen für fünf ausgewertete Bilder bei verschiedenen simulierten Auflösungsvermögen (1982)	118
Tab. 11:	Modellparameter zur Simulation des Abflusses, basierend auf fünf Höhenzonen	127
Tab. 12:	Flächen (A_z) [km^2] und mittlere Höhen ($\bar{h}$) [m ü.M.] pro Höhenzone und Teilgebiet	127
Tab. 13:	Resultate der verschiedenen Abflussimulationen (1982)	129
Tab. 14:	Relative Schneebedeckung [%] in fünf Höhenzonen und Bewölkungsgrad [%] für drei Teilgebiete basierend auf MSS-Evaluationen (1982)	133
Tab. 15:	Resultate der verschiedenen Abflussimulationen (1985)	138
Tab. 16:	Höhenbereiche und zugehörige Flächen bei fünf respektive drei oder zwei Höhenzonen	140
Tab. 17:	Relative Schneebedeckung [%] in drei Höhenzonen basierend auf Landsat-MSS- und NOAA/AVHRR-Evaluationen (Rhein-Felsberg, 1985)	140
Tab. 18:	Modellparameter für die Simulation des Abflusses basierend auf drei Höhenzonen	142
Tab. 19:	Relative Schneebedeckung [%] in zwei Höhenzonen basierend auf Landsat-MSS- und NOAA/AVHRR-Auswertungen (Rhein-Felsberg, 1985)	144

Tab. 20: Modellparameter für die Simulation des Abflusses basierend auf zwei Höhenzonen	145
--	-----

1. EINLEITUNG

1.1. Schneesmelz-Abflussimulationen aufgrund periodischer Schneeflächenbestimmungen

Süsswasser ist eine der kritischen natürlichen Ressourcen, die das Leben des Menschen ganz wesentlich bestimmt. Für eine Bewirtschaftung der Ressource "Wasser" ist es deshalb wichtig, rasch und detailliert Auskunft über ihre Verfügbarkeit zu erhalten (HAEFNER, 1980a).

Etwa 77% aller Süsswasserreserven sind in Form von Eis und Schnee gespeichert. Im Grundwasser befinden sich weitere 22%, während das Wasser in Seen und Flüssen, in der Atmosphäre und in der obersten Bodenschicht weniger als 1% ausmachen (BAUMGARTNER & REICHEL, 1975; MARTINEC, 1984). In weiten Teilen der Erde, besonders in den Hochgebirgsregionen, spielt die Schneedecke eine wichtige Rolle, da sie Wasser über längere Zeit zurückhalten kann. Neben der permanenten kommt vor allem der saisonal variierenden Schneedecke eine grosse Bedeutung für die Landwirtschaft, die Industrie und den Tourismus sowie die Hydrologie und die Klimatologie zu (RANGO, 1985b).

Auch im Alpenraum ist die saisonale Schneedecke von grossem Interesse, da dort rund 55% (Weissfluhjoch) der jährlichen Niederschläge in Form von Schnee fallen (MARTINEC, 1985c). Die Akkumulation der Schneedecke findet hauptsächlich während der Monate Oktober bis April statt; im Frühjahr und Sommer erfolgt die Ablation. Das mittlere jährliche Abflussregime eines Flusses wird massgeblich durch den jährlichen Niederschlagszyklus und den Abbau der Schneedecke geprägt. Glaziale und nivale Abflussregimes sind dadurch charakterisiert, dass der Abfluss im Frühjahr, bedingt durch die Schneesmelze, innerhalb von kurzer Zeit sehr stark zunimmt. Ein derartiges, schwer zu prognostizierendes Abflussverhalten ist aber entscheidend bei der Planung und Bewirtschaftung wasserbaulicher Projekte, wie etwa hydroelektrischer Kraftwerke, Bewässerungsanlagen, Trinkwasserversorgungen oder auch zur Flutkontrolle und entsprechenden baulichen Massnahmen.

Für eine optimale Nutzung der Wasserkraft besitzen Abflussvorhersagen grösste Wichtigkeit. Da die Stauseen in der Regel eine limitierte, für mittlere Spitzenabflüsse konzipierte Speicherkapazität verfügen, sind Prognosen über

den Zeitpunkt und die Menge des zu erwartenden Schmelzwassers notwendig. In schneereichen Jahren fällt entsprechend mehr Schmelzwasser an als in schneearmen Jahren. Bei schlechter Reservoirmanipulation würde ein Teil des verfügbaren Wassers ungenutzt abgeleitet werden. Präzise Schneeschmelz-Abflussprognosen können derartige Situationen verhindern helfen, weshalb ihnen eine wichtige ökonomische Bedeutung zukommt.

Die Ueberwachung der Schneedecke (WITMER, 1984) und eine sorgfältige Untersuchung ihres Akkumulations- und Ablationsprozesses sind somit Voraussetzung für eine optimale und sinnvolle Bewirtschaftung der Ressource "Wasser". Zahlreiche hydrologische Modelle wurden in den letzten Jahren entwickelt, um den Wasserabfluss aus der schmelzenden Schneedecke zu simulieren und zu prognostizieren. Bei der Modellierung der Schmelzwasserabflüsse aus schneebedeckten Einzugsgebieten kann zwischen der eigentlichen Schmelzgrösse und dem aus ihr und aus Niederschlägen resultierenden Gerinneabfluss unterschieden werden. Prinzipiell bestehen zwei Möglichkeiten zur Modellierung der Schmelzgrössen, nämlich Energiebilanzmodelle und empirische Modelle (LANG & BRAUN, 1985).

Energiebilanzmodelle basieren auf einem physikalischen Ansatz zur Bestimmung der einzelnen Wärmeströme an der Schneeoberfläche. Viele der Modellkomponenten erfordern spezielle Messeinrichtungen. Sie führen bei entsprechendem Aufwand zu guten Resultaten. Diese Modelle eignen sich jedoch kaum für grössere Einzugsgebiete, da nicht genügend Messeinrichtungen eingesetzt werden können. Die Interpolation der einzelnen Komponenten von einigen wenigen Messstellen auf das ganze Gebiet birgt viele Unsicherheiten.

Empirische Modelle beschränken sich im einfachsten Fall auf die Lufttemperatur als Indexgrösse für die verfügbare Schmelzwärme (Grad-Tag-Methode; Kapitel 3.1.2.2.). Dabei wird die Schmelzgrösse in Beziehung zur Summe der positiven Temperatur-Tagesmittel gesetzt. Dieses Konzept ist die Grundlage vieler Schmelzmodelle, da die Lufttemperatur die am besten verfügbare und auch räumlich gut extrapolierbare Messgrösse darstellt. Das grosse Problem dabei ist die richtige Wahl des empirischen Grad-Tag-Faktors (Kapitel 4.3.2.). Anpassungen dieses Faktors an die regionalen oder lokalen Bedingungen und an die Witterung sind nötig. Die Anpassung des Grad-Tag-Faktors kann z.B. in Funktion der Schneedichte (Kapitel 4.3.2.) erfolgen (MARTINEC, 1960).

Die Schneereserven in einem Einzugsgebiet werden aufgrund von Messungen des Niederschlags und der Lufttemperatur, oder aus direkten Punktmessungen der Schneehöhe und des Wasseräquivalents der Schneedecke für verschiedenen Höhenstufen bestimmt. Von den punktuellen Angaben wird unter Verwendung klimatologischer Beziehungen und statistischer Verfahren flächenhaft auf das ganze Gebiet extrapoliert.

Anschliessend an die Bestimmung der Schneereserven wird die Schneeschmelze für verschiedene Höhenstufen berechnet, basierend auf gemessenen und prognostizierten meteorologischen Grössen. Mittels Niederschlags-Abflussmodellen wird darauf unter Berücksichtigung der Schneeschmelze der Gerinneabfluss berechnet (BRAUN, 1985).

Da heute laufend Fernerkundungsdaten aufgenommen werden, welche die Bestimmung der räumlichen Verteilung der Schneedecke erlauben, kann in Abflussmodellen auf die Nachbildung des Schneedeckenabbaus verzichtet werden. Durch periodische Schneeflächenbestimmungen kann die Ausaperung eines Gebietes kartiert und quantifiziert werden. Daraus lässt sich das Abschmelzen der Schneedecke während einer Ausaperungsperiode in Form von "Schneebedeckungskurven" (Depletion Curves) darstellen. Diese Kurven liefern die täglichen, relativen Schneebedeckungswerte, die anschliessend für die Schmelzwasser- und Abflussimulationen und -prognosen benutzt werden (MARTINEC, 1970).

Ein Beispiel eines Modells, das Schneeflächenbestimmungen z.B. aus Fernerkundungsdaten für Abflussvorhersagen berücksichtigt, stellt das "Snowmelt Runoff Model" (SRM) dar (MARTINEC et al., 1983). Der grosse Vorteil dieses Modells besteht in der Möglichkeit, den Abfluss auch in grossen Gebieten berechnen zu können, was durch die Schneeflächenbestimmungen mittels Fernerkundungsdaten möglich wird (Kapitel 6.). Abflussimulationen und -prognosen wurden mit dem SRM bereits in Einzugsgebieten bis zu 4000 km² durchgeführt. In einem internationalen Vergleich (WMO, 1982 und 1986) mit elf anderen Modellen in mehreren montanen Einzugsgebieten schnitt das SRM gut ab.

Die Schneefläche kann mit Sensorsystemen von Flugzeugen oder Satelliten aufgenommen werden. Satelliten bieten den Vorteil, ein bestimmtes Gebiet periodisch aufzunehmen. Je nach Systemspezifikationen erlauben sie die simultane Erfassung grosser Regionen. Heute stehen verschiedene Satellitensysteme

zur Verfügung, mit denen die Schneedecke aufgenommen werden kann. Die Aufnahmen dieser Daten erfolgen vorwiegend mit Zeilenabtastgeräten (Scanner) in mehreren Spektralbereichen gleichzeitig (multispektral). Für operationelle Schneekartierungen wären aber wetter- und tageszeitunabhängige Sensorsysteme im Mikrowellenbereich eine wichtige Voraussetzung. Diese Systeme sind heute allerdings erst in Erprobung. Operationelle Auswertungen müssen deshalb auf Satellitensysteme abgestützt werden, deren Sensoren Empfindlichkeiten im sichtbaren, nahinfraroten und infraroten Bereich des elektromagnetischen Spektrums aufweisen (Kapitel 3.2.). Zur Verarbeitung der Daten dieser Systeme bedingt dies die Entwicklung geeigneter methodischer Verfahren. Für Schneeflächenbestimmungen im alpinen Raum kommen in erster Linie Aufnahmen von Wetter- (NOAA/AVHRR) und Erderkundungssatelliten (Landsat-MSS) in Frage.

1.2. Zielsetzung und Vorgehen

Ziel dieser Untersuchung ist die Simulation des Schmelzwasserabflusses basierend auf Schneeflächenbestimmungen mittels digital ausgewerteter Satellitendaten in einem grösseren hochalpinen Einzugsgebiet.

1.2.1. Problemstellung

Anhand zweier ausgewählter Jahre (1982 und 1985) sollen für ein relativ grosses alpines Einzugsgebiet (Rhein-Felsberg, 3249km², 571-3614m ü.M.; Kapitel 5.) Schneekartierungen mittels Satellitendaten (Kapitel 6.) durchgeführt und der Schmelzwasserabfluss simuliert (Kapitel 7.2., 7.4.) werden.

Zur detaillierten Erfassung der Ausdehnung und der zeitlichen Veränderungen der Schneedecke in alpinen Einzugsgebieten sind periodische, flächendeckende Erhebungen mittels Satellitensystemen notwendig. Die Aufnahmen sollten mindestens einmal wöchentlich (RANGO et al., 1984) erhältlich sein, damit aus der gemessenen Schneebedeckung die Schneebedeckungskurven präzise hergeleitet werden können.

Folglich können zur Messung der Schneebedeckung nur Satellitensysteme eingesetzt werden, die zwei Bedingungen erfüllen:

- Die Schneebedeckung in einem alpinen Einzugsgebiet muss exakt bestimmt werden können, d.h. eine angemessene räumliche Auflösung ist notwendig.
- Die Repetitionsrate muss annähernd eine Woche (oder kürzer) betragen.

Das Landsat-MSS-System vermag die erste Bedingung zu erfüllen. In mehreren Beispielen konnte bereits gezeigt werden, dass Landsat-MSS-Daten für Schneekartierungen auch in schwierigem Gelände geeignet sind (GFELLER, 1975; UR-FER, 1978; KELLER, 1987). Mit 16 (Landsat 4 und 5) bzw. 18 Tagen (Landsat 1-3) weist das System jedoch ein zu langes Intervall zwischen zwei Aufnahmen auf.

Das NOAA/AVHRR-System mit einem Repetitionszyklus von 12 Stunden vermag die zweite Forderung zu befriedigen, dafür ist das räumliche Auflösungsvermögen deutlich gröber als beim MSS-System. Es muss deshalb zuerst sorgfältig untersucht werden, inwieweit mit einer räumlichen Auflösung von 1100m x 1100m in den Alpen exakte Schneekartierungen durchführbar sind, d.h. wie sich das Auflösungsvermögen (Kapitel 3.2.2.1.), die Topographie und die minimale Gebietsgrösse auf die Klassifikationsgenauigkeit auswirken (Kapitel 3.2.2.1., 6.9.2.). Schneeflächenauswertungen mit AVHRR-Daten wurden bereits verschiedentlich durchgeführt (DEY et al., 1983). Schon seit längerer Zeit werden z.B. von der ganzen nördlichen Hemisphäre wöchentliche bis jährliche Schneebedeckungskarten erstellt (DEWEY et al., 1981). Diese Kartierungen basieren auf herkömmlichen Bildinterpretationsmethoden, wie sie auch von BURKART (1986) durchgeführt wurden. In dieser Arbeit deutet ein Vergleich mit Landsat-MSS-Evaluationen an, dass AVHRR-Daten für Schneeflächenbestimmungen im alpinen Raum geeignet sind.

Aus dem eben Gesagten wird ersichtlich, dass gegenwärtig ein einzelnes Satellitensystem für die genaue Herleitung von Schneebedeckungskurven nicht ausreicht. Folglich muss abgeklärt werden, inwieweit sich die beiden Systeme Landsat-MSS und NOAA/ AVHRR kombiniert einsetzen lassen. Dieser kombinierte Einsatz von zwei verschiedenartigen Systemen stellt in der Fernerkundung der Schneedecke eine grundlegende Neuerung dar.

Ein wesentliches Problem besteht also darin, genügend auswertbare Landsat-MSS-Daten zur Verfügung zu haben. Deshalb müssen auch teilweise bewölkte oder fehlerhafte Szenen für die Auswertung beigezogen werden. Hierzu müssen

geeignete Verfahren für den operationellen Einsatz entwickelt werden. Bei MSS-Daten kann keine spektrale Differenzierung zwischen Schnee und Wolken gemacht werden. Für die Rekonstruktion der Schneedecke unter den bewölkten Bildteilen wird ein Ansatz von LICHTENEGGER et al. (1981) verwendet (Kapitel 6.8.). Szenen mit Datenausfällen und Fehlern in der Vorverarbeitung durch die Empfangsstation erschweren die Auswertung der Daten ebenfalls. Entsprechende Methoden müssen hergeleitet werden, um mittels Bildrestaurierung derartige Aufnahmen für eine Auswertung wiederherzustellen (Kapitel 6.4.2.).

Damit die Daten verschiedener Aufnahmesysteme und Zeitpunkte miteinander verglichen und flächenmässige Auswertungen vorgenommen werden können, müssen die Aufnahmen geometrisch korrigiert werden. Ein zu Landsat-MSS-Daten grundsätzlich verschiedenes Vorgehen ergibt sich dabei für die NOAA/AVHRR-Daten (FREI, 1984). Durch die Grösse des Abtastwinkels muss bei einer solchen Korrektur auch die Erdkrümmung mit berücksichtigt werden (Kapitel 3.3.2.2.).

Im Hochgebirge stellt ein Digitales Gelände-Modell (DGM) für Schneeflächenauswertungen und Abflussberechnungen eine unabdingbare Voraussetzung dar (Kapitel 6.2.). Es müssen deshalb Möglichkeiten geprüft und ein Verfahren operationalisiert werden, um die flächenstatistische Auswertungen von Schneebedeckungskarten (Kapitel 6.6.2.) und die Herleitung hypsographischer Kurven (Kapitel 6.2.) mit Hilfe des DGM's vornehmen zu können.

Für eine weitere Auswertung müssen die bei der Klassifikation erstellten Schneebedeckungskarten mit zusätzlichen raumrelevanten Daten, wie DGM und Gebietsmasken, zu einem multivariaten Datensatz vereinigt werden (Kapitel 6.7.).

Die Resultate dieser Schneeeauswertungen liegen als thematische Karten vor, welche die Verteilung der Schneeflächen zu einem bestimmten Zeitpunkt darstellen. Die prozentualen Schneebedeckungen verschiedener Aufnahmezeitpunkte werden in Funktion der Zeit graphisch dargestellt. Für das SRM stellen diese Schneebedeckungskurven neben der Lufttemperatur und dem Niederschlag eine der grundlegenden Inputvariablen dar (MARTINEC, 1970).

In Hinsicht auf operationelle Abflussprognosen muss für die Berechnung der Schneeschmelze der zukünftige Verlauf der Schneebedeckungskurven aus Temperaturprognosen abgeschätzt werden. Die Standard-Schneebedeckungskurven sind durch die Akkumulation von Schnee, die Temperatur und die Häufigkeit von Neuschneefällen während der Ausaperungsperiode beeinflusst. Für Abflussprognosen muss deshalb eine Anpassung der Schneebedeckungskurven (MARTINEC, 1985a) vorgenommen werden. Dazu werden diese konventionellen Kurven in "modifizierte Schneebedeckungskurven" übergeführt. Sie erlauben dann eine direkte Bestimmung des Schmelzvolumens, ohne durch den Faktor "Zeit" oder die Variable "Grad-Tag-Verhältnis" beeinflusst zu werden. Die neuen Kurven erlauben damit einen direkten Vergleich der Schneemengen verschiedener Regionen oder Ausaperungsperioden (Kapitel 8.1.).

Gestützt auf die Ergebnisse der Schneeflächenbestimmung lassen sich anschliessend die Abflussimulationen vornehmen. Um den Einfluss der unterschiedlichen räumlichen Auflösungsvermögen von Landsat-MSS- und NOAA/AVHRR-Daten auf die Schneeflächenauswertungen und damit auf die Abflussberechnungen ermitteln zu können, werden die Simulationen getrennt für MSS- bzw. AVHRR-Schneeflächenevaluationen vorgenommen (Kapitel 3.1.2.2.) und verglichen.

Schwierigkeiten bei der Simulation des Schmelzwasserabflusses bieten besonders die grossen Höhenunterschiede und die grosse Ausdehnung des Testgebietes über klimatisch verschiedene Regionen. Um diese Einflüsse im Einzugsgebiet abschätzen zu können, wird es in klimatisch homogene Einheiten unterteilt und die Simulationen für diese getrennt vorgenommen (Kapitel 7.3.). In gleicher Weise soll der Einfluss der Grösse des Einzugsgebiets und der Höhenvariationen abgeklärt werden.

Die Güte dieser Simulationen kann aus einem Vergleich zwischen simulierten und gemessenen Abflussmengen abgeleitet werden. Dazu muss der natürliche Abfluss bekannt sein, der aber nicht dem gemessenen entspricht. Da in vielen alpinen Tälern Stauseen angelegt worden sind, wird der Abfluss durch die Operation der Stauwerke manipuliert. Ein Vergleich zwischen simulierten und gemessenen Abflussmengen ist somit nicht einfach zulässig. Bevor ein solcher Vergleich angestellt werden kann, muss ein Verfahren entwickelt werden, um

den natürlichen Abfluss mittels aufwendiger Umrechnungen zu rekonstruieren (Kapitel 5.6.).

Zusätzlich ergeben sich hieraus Probleme bei der Bestimmung des Rezessionskoeffizienten (Kapitel 4.3.2.). Eine derartige Rekonstruktion und der anschließende Vergleich stellen eine grundsätzliche Neuerung in der Hydrologie dar.

1.2.2. Vorgehen

Im folgenden werden die notwendigen Arbeitsgänge aufgezeigt, die für die Schneeflächenbestimmungen und die Abflusssimulationen notwendig sind.

Die verschiedenen Schritte der digitalen Auswertung von Satellitendaten werden in dieser Arbeit als bekannt vorausgesetzt. Sie sind in verschiedenen Publikationen im Detail beschrieben und brauchen deshalb hier nicht mehr ausführlich behandelt werden (DUDA & HART, 1973; HARALICK, 1976; FU & ROSENFELD, 1976).

Die Satellitenbilddauswertungen werden auf einem digitalen Bildverarbeitungssystem (Gould-DeAnza, IP8500) durchgeführt, das mit einem Host-Rechner (VAX 11/780) verbunden ist (EGELI et al., 1983); (Kapitel 3.3.4.).

Bevor die Satellitendaten ausgewertet werden können, sind verschiedene Vorverarbeitungsschritte notwendig. Ein erster Schritt beinhaltet die Restauration fehlerhafter Bildteile (Kapitel 6.4.2.). In einem weiteren Vorverarbeitungsschritt erfolgt die Maskierung bewölkter Bildteile und des Einzugsgebietes (Kapitel 6.4.5.). Um die Schneebedeckungen verschiedener Satellitenbilder miteinander vergleichen zu können, bedarf es einer gemeinsamen geometrischen Basis. Deshalb müssen die Daten geokodiert werden (Kapitel 6.4.3.). Als Bezugssystem dient das Koordinatensystem der Schweizerischen Landeskarte. Die Bildkoordinaten werden mit Hilfe der Passpunktmethode und einer affinen Rückwärts-Transformation (KIRBY, 1975) auf die Kartenkoordinaten transformiert (Kapitel 3.3.2., 6.4.3.). Bevor AVHRR-Daten der affinen Transformation unterzogen werden können, müssen Skew und panoramische Verzerrung (FREI, 1984) eliminiert werden (Kapitel 6.4.3.).

Die Klassifikation der Satellitendaten basiert auf überwachten Verfahren (Classification by Supervised Learning). Die Zuordnung der einzelnen Bildelemente erfolgt also aufgrund vorherbestimmter Kategorien, Trainingsstichproben und Zuordnungskriterien (Kapitel 3.3.3., 6.6.).

Die ausgewerteten Satellitendaten werden für die weitere Auswertung in einem multivariaten Datensatz vereinigt (Kapitel 6.7.). Ein modellgestützter Ansatz und eine Substitutionsmethode (Kapitel 6.8.) erlauben die Rekonstruktion der Schneebedeckung unter bewölkten Bildteilen. Anschliessend an die Genauigkeitsabklärung (Kapitel 6.9.2.) erfolgt die Herleitung der Schneebedeckungskurven (Kapitel 6.10.).

Neben den aus den Schneebedeckungskurven ermittelten täglichen Schneebedeckungswerten müssen für Schneeschmelz-Abflussimulationen und -prognosen mit dem SRM vom Untersuchungsgebiet tägliche Angaben über Temperatur und Niederschlag während der zu berücksichtigenden Periode zur Verfügung stehen. Ebenso müssen die Modellparameter wie Rezessionskoeffizient und Abflusskoeffizient etc. bestimmt werden (Kapitel 7.1.2.).

Die Abflussimulationen werden für die beiden Ausaperungsperioden 1982 (Kapitel 7.2.) und 1985 (Kapitel 7.4.) durchgeführt. Getrennt behandelt wird die Bestimmung des lokalen klimatischen Einflusses auf den Abfluss (Kapitel 7.3.) sowie der Einsatz von Landsat-MSS- (Kapitel 7.4.1.) bzw. NOAA/AVHRR-Schneebedeckungswerten (Kapitel 7.4.2.) für die Abflussberechnungen. Um den Einfluss der Anzahl Höhenzonen ermitteln zu können, werden die Simulationen für eine unterschiedliche Anzahl Höhenzonen durchgeführt (Kapitel 7.4.2.1., 7.4.2.2., 7.4.2.3.).

Im abschliessenden Kapitel (Kapitel 8.) werden die wichtigen Punkte besprochen, die bei operationellen Abflussprognosen berücksichtigt werden müssen: Einerseits müssen die Schneebedeckungskurven modifiziert werden (Kapitel 8.1.) und andererseits wird zur besseren Handhabung des Modells ein Experten-System vorgeschlagen (Kapitel 8.3.).

2. BEDEUTUNG DER RESSOURCE "WASSER" IM ALPINEN RAUM

Das Vorhandensein von Hydro-Elektrizitätskraftwerken in den Alpen zeigt die grosse wirtschaftliche Bedeutung der Wasserressourcen auf. Die Elektrizitätserzeugung ist stark abhängig von der saisonal variierenden Schneedecke, die das Wasser über längere Zeit speichert. Während der Ausaperungsperiode überwiegt der Anteil von Schmelzwasser am Gesamtabfluss. Niederschlag und Gletscherabfluss hingegen spielen dann eine untergeordnete Rolle.

Für eine optimale Nutzung des Wassers ist es darum wichtig zu wissen, wann wieviel Wasser durch schmelzenden Schnee abfließt. Hydrologische Modelle, die den Wasserabfluss während der Schneeschmelze simulieren und prognostizieren, besitzen deshalb eine wichtige ökonomische Bedeutung.

Im folgenden werden zuerst die Abflussverhältnisse in den Schweizer Alpen besprochen. Um die ökonomische Wichtigkeit von täglichen Schmelzwasser-Abflusssimulationen und -prognosen zu verstehen, werden auch Angebot und Nachfrage von hydroelektrischer Energie kurz dargelegt.

2.1. Geographische Charakteristika mit Bezug auf den Wasserabfluss

2.1.1. Topographie

Die Topographie der Alpen weist einen sehr heterogenen, unruhigen Charakter auf und ist in viele Kammern gegliedert. Die Schneedecke bildet deshalb nicht immer eine zusammenhängende Fläche mit einer exakt definierbaren Schneegrenze. Besonders am Uebergang zu den aperen Regionen ist sie oft in viele kleine Schneeflecken aufgelöst. GFELLER (1975) weist darauf hin, dass aus diesen Gründen sowohl der Begriff der temporären als auch der klimatischen Schneegrenze nicht klar definiert werden kann.

Bisherige Beobachtungspraxis war die punktweise Messung an einigen wenigen Beobachtungsstationen. Jeder Beobachter legt nach seinen eigenen Kriterien

die mittlere Lage der Schneegrenze fest, die nie eine präzise ausgezogene Grenzlinie darstellt. Erst als Satellitenbildern zugänglich wurden, konnte je nach räumlichem und spektralem Auflösungsvermögen des Aufnahmesystems die mehr oder weniger generalisierte Schneegrenze über grössere Gebiete hinweg einheitlich erfasst und kartiert werden.

2.1.2. Klima

Das Alpengebiet, insbesondere das schweizerische und das französische, befindet sich in einem stetigen Wechsel zwischen ozeanischem und kontinentalem Klima, wobei allerdings die atlantischen Luftmassen aus Südwest bis Nord vorherrschen. Die Orographie bewirkt eine markante Niederschlagserhöhung an der Alpennordseite. In den Ostalpen verstärkt sich der kontinentale Einfluss. Die inneralpinen Täler sind durch die umliegenden Berge geschützt, somit unter geringerem ozeanischem Einfluss und deshalb weniger niederschlagsreich. Damit lassen sich die regional-klimatischen Unterschiede, d.h. die signifikanten Differenzen in der regionalen Niederschlags- und somit auch in der Schneeverteilung begründen. Die Gebiete auf der Alpensüdseite sind mediterran beeinflusst, empfangen gleichzeitig aber auch mit Staueffekten verbundene grosse Niederschläge (KHR, 1978).

Das Winterquartal (Dezember-Februar):

Ozeanisches Westwindwetter herrscht vor. Durch die feuchten Luftmassen und das tiefe Kondensationsniveau liegen die Niederschläge über dem jährlichen Mittelwert. Besonders an west-orientierten Hängen können sehr hohe Niederschläge auftreten. In dieser Zeit wird die Schneedecke in den Alpen aufgebaut. Im Februar verstärkt sich der Einfluss kalter und trockener Luftmassen (kontinental), die Niederschlagstätigkeit nimmt ab.

Das Frühjahrsquartal (März-Mai):

Im März dominiert Hochdruckwetter, das im April durch West- und Nordwestlagen abgelöst wird. Die relativ warmen, ozeanischen Luftmassen bewirken starke Konvektionsbewölkung mit Niederschlägen. Ab und zu können kalte Luftmassen aus Nord bis Nordwest einfallen.

Das Sommerquartal (Juni-August):

Wechselhaftes Wetter verursacht an der Nordabdachung der Alpen durch Konvektions- oder Staulagen bedingte Niederschläge (Niederschlagsmaximum). Schönwetterperioden werden durch kontinentale Luftmassen oder Hochdrucklagen über Mitteleuropa verursacht.

Das Herbstquartal (September-November):

Die Schönwetterperioden können bis Ende Oktober andauern. Die Zyklonen wandern meistens vom Atlantik über Nordeuropa gegen Osten. In den Alpen kann Föhn, verbunden mit starken Stauniederschlägen auf der Alpensüdseite, auftreten. Später (anfangs November) treffen die Westwinde auch im Alpenraum ein und bringen Stürme mit starken Niederschlägen mit sich.

2.1.3. Der Wasserhaushalt in der Schweiz

Genaue Kenntnisse über den Wasserhaushalt der Schweiz hat für die Wasserwirtschaft (Trinkwasser, Bewässerung, Elektrizitätserzeugung) grosse Bedeutung. So entspricht 1mm Niederschlag auf die Fläche der Schweiz (41.3 Mio m² Wasser) derjenigen Wassermenge, die eine städtische Versorgung (in der Grösse von Basel) pro Jahr an ihre Abonnenten abgibt ¹.

Etwa 6% der Süsswasserreserven Europas lagern in der Schweiz, obwohl ihr Flächenanteil nur 0.4% beträgt. Die Niederschläge sind mit ca. 1460mm pro Jahr beträchtlich. Durchschnittlich fallen in Europa 770mm, auf allen Kontinenten zusammen etwa 800mm und auf der ganzen Welt (inklusive Ozeane) 1130mm. Somit fällt in der Schweiz beinahe doppelt soviel Niederschlag wie im Mittel aller andern Länder. Da der Verdunstungsbetrag mit ca. 480mm praktisch gleich gross ist wie in Europa, fliesst mit etwa 980mm ungefähr dreimal mehr ab als gesamthaft im europäischen oder im Mittel aller Länder.

1. Diese Angaben wie alle folgenden stammen aus: BUNDESAMT FUER UMWELTSCHUTZ, 1985

Das Wasserangebot wird durch den Niederschlag bestimmt, der zu einem grossen Teil in Form von Schnee fällt. Er entspricht dem Volumen von 60 Mia. m³ Wasser. Davon fliessen rund zwei Drittel über Oberflächengewässer wieder ab. Ueber die Flüsse verlassen insgesamt 1695m³ Wasser pro Sekunde die Schweiz. Etwa ein Drittel des Niederschlags verdunstet durch die Vegetation, von der Erdoberfläche und aus den Gewässern.

Die Wasservorräte können in verfügbare und nicht verfügbare Reserven unterteilt werden. Zu den verfügbaren zählen Seen, Schnee, Eis und nutzbares Grundwasser, zu den nicht verfügbaren das Wasser in den Poren des Bodens und im geologischen Untergrund. Etwa die Hälfte der verfügbaren Reserven bilden die Seen (132km³), ca. 74km³ sind in den Gletschern gespeichert und 50km³ im verfügbaren Grundwasser. Der in künstlichen Seen geschaffene Speicherraum hat mit 4km³ einen eher bescheidenen Anteil an den gesamten Reserven, doch bilden sie eine äusserst wichtige Grundlage für die Elektrizitätsversorgung der Schweiz.

Das in der Regel grosse Angebot an Wasser hat in den letzten Jahren und Jahrzehnten dazu geführt, dass allzu sorglos mit dieser kostbaren Ressource umgegangen wurde. Der Wasserbedarf in der Schweiz für Trink- und Brauchwasser der Haushalte, des Gewerbes, der Industrie (inklusive Kühlung von Kernkraftwerken) und für landwirtschaftliche Zwecke beträgt jährlich, ohne die Nutzung der Wasserkraft, 3,2 km³. Davon werden 50% zu Kühlzwecken verwendet, 10% zur Bewässerung und der Rest wird als Trink- oder Brauchwasser benutzt, das dann als Abwasser wieder anfällt. Der gesamte jährliche Wasserbedarf entspricht heute ungefähr dem Stauvolumen aller Speicherseen.

2.1.4. Der Wasserkreislauf in einem alpinen Einzugsgebiet

Ein Einzugsgebiet kann als geschlossenes System (LAUFER, 1977) betrachtet werden, wenn man von unterirdischen, geologisch oder wasserwirtschaftlich bedingten Zu- und Abflüssen absieht: Der Niederschlag stellt den Input, der Wasserabfluss und die Verdunstung stellen den Output dar.

Während des Winters und zu Beginn des Frühjahrs erfolgt der Input vor allem als Schnee. Gegen den Sommer hin nimmt der Niederschlag in Form von Regen

überhand. Das Abflussregime wird vorwiegend durch die Temperatur kontrolliert. Der Schnee ist physikalischen Transformationsprozessen (Metamorphose) unterworfen, d.h. die Dichte des Schnees nimmt stetig zu. Erst nach einem Reifungsprozess kann Schmelzwasser aus der Schneedecke abfließen. Parallel mit dem Ansteigen der Temperatur erfolgt auch der Ablationsprozess; ein zeitweiliges Absinken der 0°C-Isotherme in der freien Atmosphäre unterbricht die Schneeschmelze vorübergehend. Während der Hauptschneeschmelze ist der Regen von untergeordneter Bedeutung. Bei abnehmender Schneeschmelze (anfangs Sommer) nimmt die Bedeutung des Regens und der Gletscher für den Abfluss stark zu. Im September sinkt die 0°C-Isotherme in tiefere Lagen ab. Gleichzeitig mit der Temperaturabnahme verringert sich auch der Abfluss.

Verluste von Wasser sind durch Infiltration in den Boden und durch Evapotranspiration bedingt. Ueber schneebedeckten Gebieten sind Verluste durch Evaporation vernachlässigbar (oft Kondensationsbedingungen), nicht aber über aperen Gebieten. Die Wassermengen, die durch die Evapotranspiration für den Abfluss verlorengehen, können bis heute nur ungenau bestimmt werden.

2.1.5. Der Abfluss in den Schweizer Alpen

Unter Wasserabfluss wird der Anteil von Niederschlag, der das Einzugsgebiet in ober- oder unterirdischen Gerinnen wieder verlässt, verstanden. Abfluss ist also das Resultat der Art des Niederschlags (flüssig – fest), sowie der Schmelzprozesse von Schnee und Gletschern. Die Messung des Abflusses und die graphische Aufzeichnung der Abflussmengen erfolgt durch hydrographische Stationen. Eine typische Abflussganglinie (Abb. 15) weist einen aufsteigenden Ast, ein Kulminationssegment und einen abfallenden Ast (Rezession) auf. Der Charakter des aufsteigenden Astes im Hydrographen wird hauptsächlich durch die vorhergehenden meteorologischen Verhältnisse bestimmt. Die Rezessionskurve gibt die Abnahme des Abflusses in einer Periode ohne Schneeschmelze oder Niederschlag an, abhängig von den Charakteristika (Topographie, Vegetation, Geologie) einer Region.

In den Schweizer Alpen wird der maximale Abfluss als Resultat der Schneeschmelze in den Monaten Mai bis August gemessen. Das Abflussminimum ist zwischen Dezember und April zu verzeichnen. Da in den Alpen 50-70% der jährli-

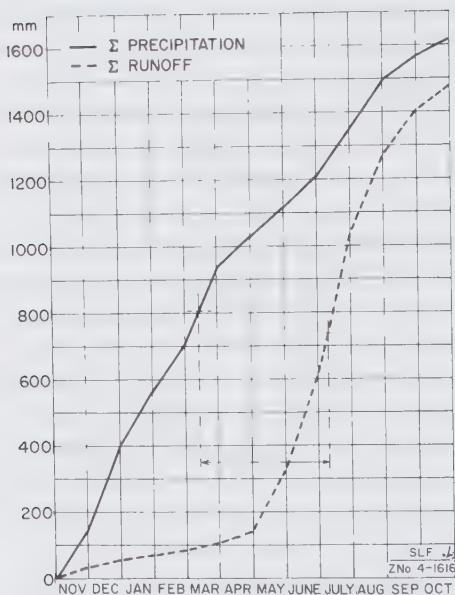


Abb. 1 : Summenkurven für Niederschlag und Abfluss im alpinen Einzugsgebiet Dischma (hydrologisches Jahr 1967)

(aus MARTINEC, 1985b)

chen Niederschläge (MARTINEC, 1985c) in Form von Schnee fallen, wird der Abfluss weitgehend von der Schneeschmelze bestimmt. Das als Schnee zurückgehaltene Wasser wird für Wochen oder Monate im Einzugsgebiet gespeichert. Der Abfluss findet also gegenüber dem Niederschlagsereigniss stark verzögert statt. In Abb. 1 sind die Summenkurven für den Niederschlag und den Abfluss für ein kleines alpines System aufgezeichnet. Deutlich ersichtlich ist die Verzögerung von ca. vier Monaten zwischen Niederschlag und Abfluss: Mitte März sind etwa 50% des jährlichen Niederschlags gefallen, während 50% des Abflusses erst ungefähr Mitte Juli erreicht werden. Das Wasser der Schneeschmelze fließt, hier und da zusammen mit dem Abfluss aus aktuellen Niederschlägen, relativ rasch ab. Das Zusammenfallen der Schneeschmelze mit Nie

derschlagsereignissen kann Ueberflutungen mit schweren Folgeschäden bewirken.

Der Einfluss der Gletscher auf den Abfluss ist bekanntlich recht gross. Wechsel im Gletschervolumen können den jährlichen Abfluss beträchtlich beeinflussen, was wiederum für die Elektrizitätswirtschaft Folgen zeigt. Gletscherabfluss findet vor allem im zweiten Teil des Sommerhalbjahres statt, nachdem durch Abschmelzen der Schneedecke über dem Gletscher das Eis freigelegt ist. Da der flächenhafte Anteil der Gletscher am später zu diskutierenden Einzugsgebiet Rhein-Felsberg (Kapitel 5.), im Gegensatz zu anderen Regionen, relativ gering ist (3%), wird dieser Effekt bei den Abflusssimulationen in unserem Beispiel nur am Rande berücksichtigt.

Der effektiv gemessene Abfluss entspricht wegen der vorhandenen Stauseen und deren Manipulation durch die Hydro-Elektrizitätswerke nicht dem natürlichen. Die täglichen Schwankungen des Abflusses der meisten alpinen Flüsse spiegeln vielmehr die Nachfrage nach Elektrizität wider (Abb. 2).

Während der Werkzeuge wird je ein Maximum und ein Minimum gemessen, entsprechend dem täglichen Stromverbrauch. An Wochenenden, die üblicherweise geringeren Elektrizitätskonsum aufweisen, werden entsprechend minimale Abflusswerte registriert. Neben diesen kurzfristigen Abflussschwankungen sind auch saisonale Variationen festzustellen. So wird bekanntlich Wasser während der Schneeschmelze und bei grossen Niederschlagsereignissen zurückgehalten (Sommer/Herbst), um genügend Reserve zur Deckung des Spitzenbedarfs im Winter zu haben.

Ein weiterer Einfluss auf die Abflussmengen übt das von vielen Kraftwerkgesellschaften mit billigem Nachtstrom praktizierte Rückpumpen von niederen in höher gelegene Staubecken aus.

Die einzelnen Monate lassen sich in Bezug auf den Abfluss im Alpenraum wie folgt beschreiben (nach ASCHWANDEN & WEINGARTNER, 1983):

Januar, Februar, März: Wintermonate mit minimalem Abfluss. Die nivale Retention überwiegt die pluviale Komponente des Abflusses weitgehend. Zwischen den Abflusskoeffizienten (definiert als das Verhältnis von jährli-

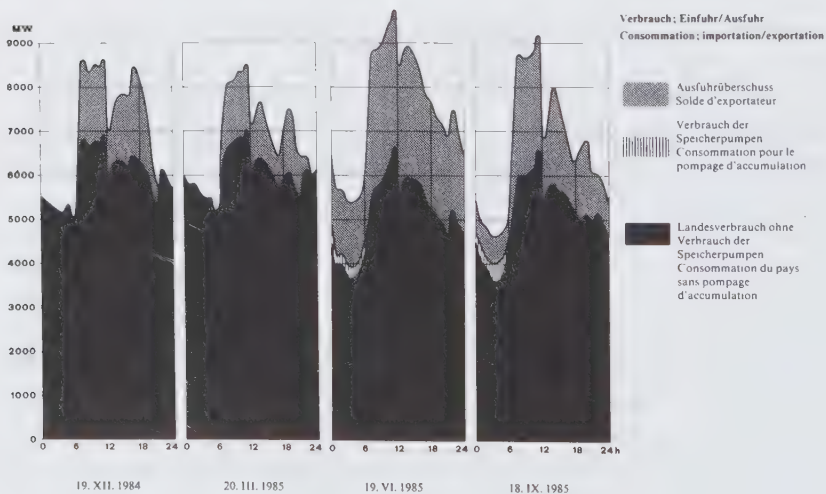
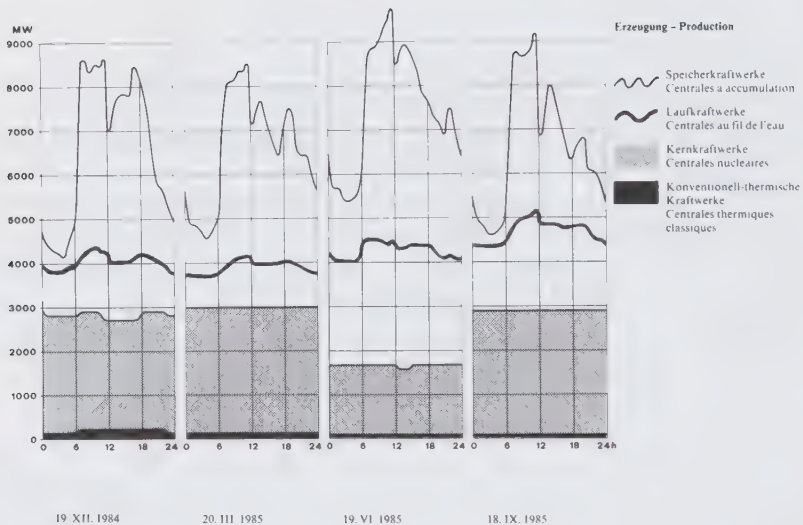


Abb. 2 : Elektrizitätserzeugung (oben) und Elektrizitätsverbrauch (unten) von schweizerischen Kraftwerken für ausgewählte Daten

(aus SEV/VSE, 1986)

chem Abfluss zu jährlichem Niederschlag) bestehen nur geringe Unterschiede.

April: Wendepunkt zwischen minimalem und maximalem Abfluss. Die Abflusskoeffizienten von höhergelegenen Gebieten unterscheiden sich von tiefergelegenen.

Mai: Beginn der Schneeschmelze in tieferen Lagen.

Juni, Juli, August, September: Hauptschneeschmelze: 50-70% des Jahresabflusses fallen während der Zeit der Schneeschmelze an. Der Abfluss im Juni wird weitgehend durch die Schneeschmelze geprägt. Im Juli, August und September verstärkt sich der Einfluss des Gletscherabflusses, in tieferen Lagen jener des Abflusses aus dem Niederschlag.

Oktober: Fehlende Schmelzprozesse

November, Dezember: Wintermonate mit überwiegend Schneeakkumulation

Die jährlichen Abflussregimes hängen mit dem Niederschlagszyklus sowie der Eis- und Schneeschmelze zusammen. Eine erste Unterteilung gelingt durch die Suche nach jener mittleren Einzugsgebietshöhe, die eingipflige von mehrgipfligen Abflussregimes optimal trennt (ASCHWANDEN & WEINGARTNER, 1983). Für die Schweiz gelten:

- mehrgipfliges Regime, mittlere Höhe $\bar{h} < 1550\text{m ü.M.}$:
 - mittelländisch-jurassisches Regime
- eingipfliges Regime, mittlere Höhe $\bar{h} \geq 1550\text{m ü.M.}$:
 - alpines Regime

Die Abflussregimes können weiter nach dem Zeitpunkt und dem Betrag des Abflussmaximums und deren monatlicher Abfolge im Bereich des Maximums (Mai-September) typisiert werden.

2.2. Hydroelektrizität in der Schweiz

Die Wasserkraft spielt zur Erzeugung elektrischer Energie in der Schweiz eine wichtige Rolle, werden doch 60% (1985) der Elektrizität durch Wasserkraft erzeugt (SEV/VSE, 1986). Die Nutzung der Gewässer ist in den letzten Jahrzehnten kontinuierlich gestiegen: Zwischen 1930 und 1950 wurde sie verdoppelt, zwischen 1930 und 1970 sogar versechsfacht. In den vergangenen Jahren hat sich die Produktionskapazität jedoch kaum mehr erhöht. Dagegen ist jetzt, durch verschiedene Ereignisse ausgelöst, das Interesse an einer Steigerung der Produktivität durch die optimale Ausnutzung der Wasserkraft, merklich gestiegen. Einerseits kann dies durch eine optimale Anpassung der Elektrizitätserzeugung (Zeitpunkt) an die Nachfrage geschehen, andererseits durch einen Ausbau der bestehenden Anlagen.

Die Grande Dixence Werke z.B. wollen, ohne die Staumauern zu erhöhen oder neue Stauseen anzulegen, die Produktion steigern, indem neue Pumpwerke und Druckschächte gebaut und zusätzlich noch weitere Wasserfassungen angelegt werden (NZZ, 1986). Es wird betont, dass die Erneuerungen eine markant bessere Ausnutzung des Wassers gestatten werden. Elektrizität soll vermehrt dann erzeugt werden, wenn sie tatsächlich gebraucht wird.

In jedem Fall wird die Produktion durch die Bewertung der vorhandenen Wasserreserven geleitet. Für eine optimale Nutzung der Wasserkraft stellen deshalb auch präzise Prognosen des täglich zu erwartenden Abflusses eine wesentliche Entscheidungshilfe dar.

2.2.1. Elektrizitätserzeugung

Mit Kern- und Laufkraftwerken sowie konventionell-thermischen Kraftwerken wird Bandenergie erzeugt, d.h. die Basisproduktion stützt sich auf diese Kraftwerktypen ab. Der Spitzenbedarf kann von diesen Werken nicht gedeckt werden. Hierzu dienen Speicher- und Pumpspeicherwerke.

Speicherkraftwerke spielen eine herausragende Rolle bei der Deckung von Engpässen in der Stromversorgung während Spitzenzeiten. Schwierigkeiten können

auftreten, da die Produktionsmuster nicht mit denjenigen der Nachfrage übereinstimmen. Die Nachfrage während Spitzenstunden kann nicht befriedigt werden und im Winter, wenn am meisten Energie benötigt wird, liefern die Laufwerke infolge geringer Wasserführung am wenigsten. Das Defizit kann durch die Speicherung von Wasser etwas ausgeglichen werden. Wegen der limitierten Speicherkapazität der Stauseen, die nicht für extrem abflussintensive Jahre konstruiert wurden, muss im Sommer öfters Wasser ungenutzt abgeleitet werden. Im Sommerhalbjahr besteht also eine Ueberkapazität mit 52% der jährlichen Produktion, im Winter ein Defizit mit 48% der jährlichen Produktion (SEV/VSE, 1986).

Durch die Speicherung von Wasser kann Energie vom Sommer in den Winter transferiert werden. Transfer bedeutet in diesem Fall, dass die Speicherseen während der Schneeschmelze gefüllt und das Wasser für die Zeit der grössten Elektrizitätsnachfrage zurückbehalten wird. Im Gegensatz zu andern Kraftwerktypen ist hier die äusserst wichtige Speicherung von Energie möglich. Aufgrund dieses Transfers liegt das Schwergewicht der Produktion mit 60% auf dem Winterhalbjahr.

Bei niedrigem Verbrauch ist ein Ueberschuss an Energie vorhanden. Ueberschüssige Bandenergie wird z.T. dazu verwendet, bei Pumpspeicherwerken Wasser von tieferen in höher gelegene Reservoirs zurück zu pumpen. Der Vorteil liegt darin, dass die täglich produzierte Energie zu einem Zeitpunkt geliefert werden kann, zu dem sie auch benötigt wird. Obwohl dabei Verluste in Kauf genommen werden müssen, lohnt sich das Rückpumpen, da mit dem zusätzlichen Wasser der teure Spitzenbedarf besser gedeckt werden kann (ökonomischer Vorteil).

2.2.2. Kraftwerkanlagen und Verteiler-Netzwerk

Die meisten Stauseen in den Schweizer Alpen befinden sich oberhalb von etwa 1500m ü.M., um ein maximales Gefälle erreichen zu können. Die zugehörigen Einzugsgebiete liegen in Höhen bis zu 4000m ü.M.. Damit die Stauseen optimal gefüllt werden können, wird zudem Wasser aus verschiedenen Tälern durch komplizierte Verbindungen von Leitungen, Tunnels und Pumpen in einem Stausee gesammelt.

Druckleitungen mit einem steilen Gradienten – normalerweise in ein oder zwei Stufen mit Höhenunterschieden von 200m bis 1000m – leiten das Wasser aus den Stauseen auf die Turbinen.

In der Schweiz wird die Elektrizität durch verschiedene privatrechtlich organisierte Gesellschaften produziert. Jede dieser Gesellschaften besitzt eigene Energiequellen, Verteiler-Netzwerke und eine selbständige Preispolitik. Die einzelnen Institutionen sind aber untereinander eng verknüpft, um Energie im Bedarfsfall austauschen zu können. Es besteht auch eine anteilmässige Beteiligung einzelner Gesellschaften an anderen. In der Schweiz existieren zwei Gruppen von Produzenten und Verteilern, nämlich private und staatliche Unternehmen, die Elektrizität auf drei verschiedenen Wegen erzeugen und verteilen:

- a) Von eigenen Kraftwerken: Diese können frei betrieben werden.
- b) Von Kraftwerken, deren Eigentümer verschiedene Gesellschaften sind (Partnerwerke): Elektrizität kann nicht beliebig produziert werden. Auf die Bedürfnisse der einzelnen Teilnehmer muss Rücksicht genommen werden.
- c) Von fremden Unternehmen (auf dem Energiemarkt) gekauft: Es bestehen Kontrakte zum Kauf und Verkauf einer bestimmten Menge Energie zu festgelegten Preisen und zu gewissen Zeiten (Termingeschäfte).

2.2.3. Die Elektrizitätsnachfrage

Die Statistik über den Verbrauch elektrischer Energie zeigte 1985 (SEV/VSE, 1986) folgende Spitzenwerte: An erster Stelle lag mit 44% die Industrie und das verarbeitende Gewerbe, gefolgt von den Haushalten mit 28% und den Dienstleistungen mit 19%. Verkehr und Transport (8%) sowie die Landwirtschaft (1%) machen einen relativ geringen Anteil aus. Aus diesen Zahlen können die Zeiten des maximalen Stromverbrauchs abgeleitet werden:

- an Werktagen, während den üblichen Arbeitszeiten
- an Wintertagen (vormittags)

Mit minimalen Werten kann im Sommer zur Nachtzeit und an Wochenenden gerechnet werden. Tageszeit, Wochentag und Jahreszeit beeinflussen den Elektrizitätsverbrauch also ganz entscheidend (Abb. 2).

Mit diesen Darlegungen der Hydroelektrizitätsgewinnung soll die Motivation und der Rahmen abgesteckt werden, in denen die geplanten Schneeschmelz-Abflusssimulationen zur Bedeutung kommen sollen.

3. DIE ERFASSUNG DER SCHNEEDECKE MIT METHODEN DER FERNERKUNDUNG

Die Forderung nach optimaler Nutzung der Wasserressourcen führt zur Frage möglicher Schmelzwasser-Abflussprognosen und damit verbunden zur Frage nach einer Modellierung des Abflusses. Entsprechend der Bedeutung der Fragestellung wurden in den vergangenen Jahren mehrere Modelle zur Simulation und Prognose des Schmelzwasserabflusses entwickelt (Kapitel 4.). In Gebirgen mit einer saisonal variierenden Schneedecke sind Modelle gefragt, die den aus der Schneeschmelze resultierenden Abfluss speziell berücksichtigen.

Die Fernerkundung ermöglichte die Entwicklung eines Modelltyps, der im Gegensatz zu andern Modellen die gemessene Schneefläche als Inputvariable aufweist. Periodische Angaben über die räumliche Verteilung der Schneedecke waren bis vor kurzem nicht erhältlich. Bei der Modellierung behalf man sich, indem man eine Abschätzung der Schneeflächenausdehnung aufgrund von Punktmessungen (WITMER, 1984) vornahm. Mit den Fernerkundungsmethoden hingegen gelingt es, die räumliche Ausdehnung der Schneedecke zu verschiedenen Zeitpunkten und damit ihre dynamische Veränderung exakt zu kartieren.

Heute existieren verschiedene Fernerkundungs-Systeme, mit denen solche Messungen durchgeführt werden können (Kapitel 3.2.) und sich Schneebedeckungskarten ableiten lassen. Die Aufnahmesysteme werden sowohl von Flugzeugen als auch von Satelliten aus eingesetzt. Der wichtigste Vorteil von Aufnahmen aus dem Weltraum besteht in der Möglichkeit, grosse Gebiete erfassen zu können, ausgehend von einem einzelnen Tal bis hin zu ganzen Kontinenten. Eine periodische Aufnahme grösserer Gebiete mit herkömmlichen Luftbildern ist meistens nicht durchführbar. Gerade die Periodizität stellt aber einen entscheidenden Faktor bei der Ueberwachung von Veränderungen auf der Erdoberfläche, wie z.B. der Schneedecke, dar. In der Folge werden deshalb nur Daten von Satelliten-Scanner-Systemen zur Schneeflächenbestimmung verwendet.

Bevor jedoch im Detail auf die verwendeten Systeme und die Verarbeitung ihrer Daten (Kapitel 3.3.) eingegangen werden kann, müssen einige wichtige physikalische Eigenschaften von Schnee besprochen werden, um einerseits die hydrologischen Vorgänge, die zur Schmelze führen zu verstehen und um andererseits die Reflexionseigenschaften von Schnee für den Einsatz geeigneter

Sensoren kennenzulernen. Detaillierte Besprechungen sind bei M. de QUERVAIN (1972), O'BRIEN & MUNIS (1975) und MARTINEC (1976) zu finden.

3.1. Physikalische Eigenschaften von Schnee

3.1.1. Die Entstehung von Schnee

Schnee besteht aus Eiskristallen und ist die häufigste Form des festen Niederschlags bzw. der festen Ablagerung (Schneedecke). Die verschiedenen Schneearten werden aufgrund ihrer spezifischen, physikalischen Eigenschaften definiert:

- Kornform und -grösse
- Packung (Dichte und Gefügefestigkeit)
- Temperatur
- Freier Wassergehalt

Neuschnee ist frisch gefallener Schnee, der noch keinem Transformationsprozess unterworfen worden ist; die ursprüngliche Form der Eiskristalle ist demzufolge noch erkennbar. Firn unterscheidet sich von Schnee dadurch, dass er mindestens einen Sommer überdauert hat. Eis hat im Gegensatz zu Schnee kein kommunizierendes Porenvolumen mehr, sondern besitzt nur noch isolierte Luftblasen.

Die Entstehung und die Metamorphose von Schnee sind geprägt durch die Wechselwirkungen zwischen Luft, Wasserdampf, Wasser und Eis. Bei der Abkühlung ungesättigter Luft wird die Sättigungsfeuchte bei der Taupunkttemperatur erreicht. Dabei kann übersättigter Wasserdampf in Anwesenheit von Kondensationskernen kondensieren. Bei weiterer Abkühlung der Wolke entstehen Eiskristalle, die auf Kosten der Wassertröpfchen wachsen. Bei einer starken Uebersättigung bilden sich verästelte Schneekristalle, die abzusinken beginnen. Wenn Luftschichten mit positiven Temperaturen durchfallen werden, schmelzen die Eiskristalle (Uebergang zu Regen). Schnee fällt meist als Flocken zusammengeballter Eiskristalle oder, bei grosser Kälte, als einzelne Eiskristalle (FOEHN, 1985).

Durch die Ablagerung der Schneekristalle im Gelände wird die Schneedecke aufgebaut. Durch Windverfrachtung kann die Verteilung des Schnees innerhalb einer Region stark beeinflusst werden und zu einer unregelmässig mächtigen Schneedecke führen. Die Messung des Schneefalls stellt grössere Probleme als die der Erfassung des flüssigen Niederschlags (Windeinfluss). Ebenso kann aus einer Punktmessung nicht einfach auf die flächenhafte Verteilung der Schneedecke geschlossen werden.

3.1.2. Die Metamorphose von Schnee

Nach der Ablagerung des Schnees finden in der Schneedecke verschiedene Umformungsprozesse (Metamorphose) statt. Während der Metamorphose, die meistens an der Schneeoberfläche beginnt, werden die ursprünglichen Strukturen der Schneekristalle transformiert. Ursache dafür sind Lufttemperatur, -feuchtigkeit und -druck, in geringerem Masse auch die Windgeschwindigkeit. Wichtigster Faktor für die Alterung von Schnee ist aber die Zeit. Abgelagerter Schnee wandelt sich hinsichtlich Struktur, Korngrösse und -form, basierend auf folgenden Prozessen (de QUERVAIN, 1972):

- a) Isotherme (abbauende) Metamorphose: Neuschneekristalle verändern sich bei konstanter Temperatur unter dem Gefrierpunkt in Richtung von abgerundeten Körnern (Prozesse nicht vollständig bekannt).
- b) Gradientenmetamorphose (aufbauend): Die Kristallgrösse nimmt stark zu, während die Anzahl Kristalle abnimmt. Gleichzeitig verändert sich die Kristallform in Richtung Hohlform (Becherform). Bedingung dazu ist ein Temperaturgradient innerhalb der Schneedecke, der durch die Luftdurchlässigkeit des Schnees verursacht wird.
- c) Schmelzmetamorphose: Sie beinhaltet das eigentliche Schmelzen von Schneekristallen und -körnern und hat eine Dichtezunahme zur Folge (Prozesse nicht vollständig erforscht). Die Prozesse sind beeinflusst durch Wiedergefrieren der Nassschneedecke.

3.1.2.1. Die Schneedichte

Die Schneedichte spielt in der Schneehydrologie eine wichtige Rolle. Die Anfangsdichte von Schnee ist durch die Form und die Packung des Neuschnees gegeben. Während der abbauenden Metamorphose erhöht sich die Dichte, da die Körner weniger Raum beanspruchen. Der Schnee wird auch durch sein Eigengewicht und äussere Belastungen verdichtet. Allgemein ist die Dichte stark temperaturabhängig: Hohe Schneetemperaturen haben eine stärkere Dichtesteigerung zur Folge als tiefe Temperaturen. Neuschnee weist eine Dichte von der Grössenordnung 0.1 g/cm^3 , Altschnee eine solche von 0.5 g/cm^3 auf.

Die Schneedecke kann anhand der Schneedichte, der Schneehöhe, des Wasseräquivalents und der Schneedeckendauer gekennzeichnet werden. Das Wasseräquivalent ist definiert als die zu einer Schneesicht äquivalente Wasserschichthöhe und wird aus dem Produkt von Schneedichte und Schneehöhe erhalten.

3.1.2.2. Energiehaushalt der Schneedecke

Die Schneeschmelze ist das Resultat des Energieumsatzes an der Schneeoberfläche und in der Schneedecke und wird bestimmt durch (de QUERVAIN, 1972):

- a) Austausch mit der Atmosphäre: Wärme-, Dampf- und Strahlungsaustausch, Massenzuwachs der Schneedecke durch Niederschläge
- b) Austausch in der Schneedecke: Wärmeleitung über Eisgerüst und Porenluft, Dampftransport
- c) Austausch mit Boden: Wärmeleitung, Wasserabfluss

Die Bilanz aller Energieströme durch die Schneeoberfläche bestimmt den energetischen Zustand der 0°C -isothermen Schneedecke (MARTINEC, 1976; pp. 101):

$$Q_m = Q_s + Q_b + Q_h + Q_e + Q_p + Q_c$$

- wobei
- Q_m = Energiebilanz der Schneedecke (totale, für die Schmelze zur Verfügung stehende Wärme)
 - Q_s = von der Schneedecke absorbierte, einfallende Strahlung (kurzwellig)
 - Q_b = langwelliger Strahlungsaustausch zwischen Umgebung und Schneedecke
 - Q_h = fühlbarer Wärmestrom zwischen Luft und Schneedecke durch Konvektion und Leitung aus der Atmosphäre
 - Q_e = latenter Wärmestrom: Wärmegewinn (oder Verlust) abhängig von Temperatur und Feuchtigkeit. Evaporation bewirkt einen Wärmeverlust, bedingt durch eine negative Differenz zwischen Wasserdampfdruck der Luft und der Schneeoberfläche
 - Q_p = Wärme, die der Schneedecke durch Regen zugeführt wird
 - Q_c = Wärmestrom durch Leitung vom Boden in die Schneedecke

Hauptfaktoren für die Schneeschmelze sind nach MARTINEC (1976) der Strahlungshaushalt (Q_s , Q_b) und der fühlbare Wärmetransport (Q_h). Die grösste einzelne Wärmequelle für alle Schneeschmelzperioden ist die Einstrahlung (Q_s) mit einem Anteil am Wärmegewinn von 35%. Der Strahlungshaushalt wird massgeblich durch die Topographie und die Veränderungen der Albedo beeinflusst. Der Wärmeeintrag durch Regen und Wärmeleitung vom Boden können als klein betrachtet werden.

Die meisten Komponenten der Energiebilanzgleichung können nicht exakt bestimmt werden, womit eine Modellierung des Abflusses, die den gesamten Energiehaushalt der Schneedecke berücksichtigt, sehr schwierig ist. Aufgrund eines empirischen Ansatzes, dem sogenannten Grad-Tag-Verfahren (MARTINEC, 1976; pp. 91) kann die Schneeschmelze auf einfache Art, basierend auf Luft-Temperaturmessungen, berechnet. Die Grad-Tag-Methode wird in vielen Modellen verwendet, da die Temperatur ein gutes Mass für den Energiefluss und gleichzeitig leicht zu messen, zu extrapolieren und vorherzusagen ist. Die Anzahl Grad-Tage wird durch die Summe aller Messungen mit positiven (Luft-) Temperatur-Tagesmittel erhalten; negative Temperaturen werden weggelassen. Der Grad-Tag-Faktor ist das Verhältnis von Wasseräquivalent des geschmolzenen Schnees zu Anzahl Grad-Tage für eine gewisse Anzahl Tage (z.B. eine Ausaperungsperiode) und basiert auf folgender Beziehung:

$$\Delta HW \approx \alpha \sum_{i=1}^N T_{Di}^+ \quad [\text{mm H}_2\text{O}]$$

wobei ΔHW = Wasseräquivalent (Wasserhöhe)
 T_{Di}^+ = positive Grad-Tage = positive mittlere Luft-Temperatur des Tages i
 α = Grad-Tag-Faktor (in mm H₂O pro °C und Tag)
 N = Anzahl Tage

Durch die während der Ausaperungsperiode oft wechselnden Bedingungen kann nicht erwartet werden, dass der Grad-Tag-Faktor über die ganze Periode konstant bleibt. MARTINEC (1960) hat daher eine empirische Formel entwickelt, welche die Variation des Grad-Tag-Faktors in Beziehung zur Schneedichte stellt (Kapitel 4.3.2.). Erfahrungsgemäss nimmt mit fortschreitender Schmelze die Schneedichte, wie auch die kurzweilige Einstrahlung bis zum Sonnenhöchststand Ende Juni zu, während der reflektierte Anteil der Strahlung durch Vermindern der Albedo abnimmt. Diese Vereinfachung der Energiebilanz der Schneedecke ist zulässig, da Wärmeaustausch und Strahlungsbilanz über längere Zeit korreliert sind (MARTINEC, 1976).

Die Schmelzwasserbildung in Schnee beginnt an der Schneeoberfläche durch direkten Wärmeaustausch mit der Atmosphäre, durch Strahlungsabsorption, durch Regen in die Oberflächenschicht und durch Wärmeübertragung vom Boden. Das aus der Schneeschmelze resultierende oder von Niederschlägen stammende Wasser sickert nicht sofort auf den Grund der Schneedecke, da Schnee je nach Art ein gewisses Retentionsvermögen (Wasserrückhaltevermögen) besitzt, d.h. das Wasser wird im Schnee gespeichert, abhängig vom Metamorphosegrad. Sobald das Rückhaltevermögen der Schneedecke erreicht ist, beginnt der Schmelzwasserabfluss aus der Schneedecke. Ueberflüssiges Schmelzwasser fliesst ab, wenn nicht wasserundurchlässige Schichten (Eis) einen Stau verursachen. Ist die Schneedecke nicht 0°C-isotherm, kann Schmelzwasser zeitweise auch wieder gefrieren (thermische Retention). Wiederholtes Schmelzen und Wiedergefrieren über längere Zeit führt zur Verfirnung (de QUERVAIN, 1972).

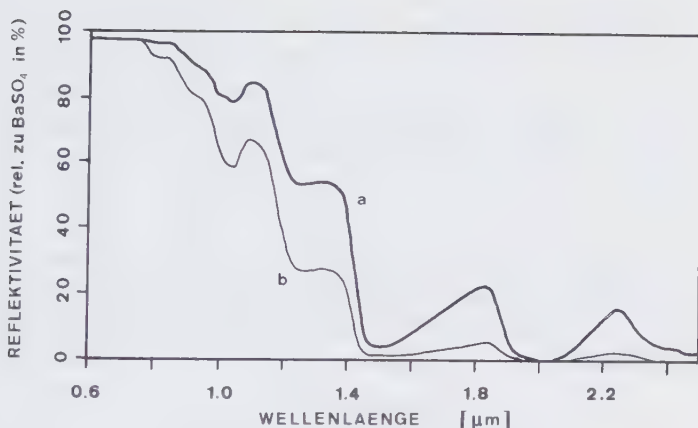


Abb. 3 : Spektrale Reflexionskurven für Neu- (a) und Altschnee (b)

(nach O'BRIEN & MUNIS, 1975)

3.1.3. Spektrales Reflexionsverhalten von Schnee

Die spektrale Reflektivität von Schnee hängt von Parametern wie Korngrösse und -form, Verunreinigungsgrad, Flüssigwassergehalt in Oberflächennähe und Oberflächenrauigkeit sowie dem Sonnenstand ab.

Frisch gefallener Schnee reflektiert im sichtbaren Bereich des elektromagnetischen Spektrums sehr stark (Abb. 3). Im Nahinfraroten beginnt die Reflektivität markant abzunehmen. Bei $1.5\mu\text{m}$ erreicht sie Minimalwerte, die nur noch bei $1.55\text{--}1.75\mu\text{m}$ und $2.1\text{--}2.35\mu\text{m}$ leicht übertroffen werden. Wolken reflektieren bei Wellenlängen $>1.5\mu\text{m}$ hingegen noch sehr stark. Deshalb ist eine spektrale Trennung von Wolken und Schnee in diesen Bereichen möglich (MURI, 1981).

Durch die Alterung von Schnee nimmt die Reflektivität über den sichtbaren und nahinfraroten Spektralbereich ab. Die stärkere Abnahme bei Wellenlängen im Nahinfraroten ist durch das Schmelzen und Wiedergefrieren innerhalb der

Oberflächenschicht und durch Unreinheiten im Schnee bedingt. Durch die Metamorphose erhöht sich die Korngrösse und die Dichte, was eine Veränderung in der Reflektivität zur Folge hat. Da die Abnahme im sichtbaren Bereich langsamer vor sich geht als im nahinfraroten, ist es möglich, verschiedene Schneearten aufgrund ihres Reflexionsverhaltens zu unterscheiden. Die Differenzierung erfolgt am deutlichsten bei Spektralwerten von $0.8\text{--}1.4\mu\text{m}$ (STAENZ, 1976; MARBOUTY et al., 1978).

Für die Beschreibung der Reflexionseigenschaften von Objekten eignet sich der Begriff Albedo. Die Albedo des Schnees im sichtbaren Bereich ist von der Korngrösse, dem Wassergehalt und den Fremdsubstanzen abhängig und beträgt im Durchschnitt für:

Neuschnee:	90-95%
Altschnee:	50-80%
Verschmutzter Schnee:	<50%
Dunkles Gestein:	<5%

(nach de QUERVAIN, 1972)

Abb. 4 illustriert die Abnahme der Albedo von Schnee während der Akkumulations- bzw. Ablationsphase, verglichen mit der zunehmenden Schneedichte.

3.1.4. Die saisonale Schneedecke

3.1.4.1. Schneeablagerung und Verteilung

Die Schneeablagerung und -verteilung in den Schweizer Alpen sind sehr variabel. Verursacht wird diese Vielfalt durch das Zusammenspiel von Topographie und Witterung und wird bestimmt durch:

- die allgemeine Wetterlage, d.h. die grossräumigen, atmosphärischen Zirkulationsverhältnisse
- die orographischen Verhältnisse
- die Höhenlage (Spezialfall der orographischen Verhältnisse): Der Anteil von Schnee am Gesamtniederschlag nimmt zu (WITMER et al., 1986)
- lokale Niederschlags-, Wind- und Temperaturverhältnisse

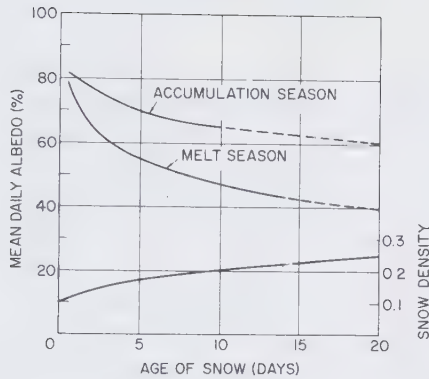


Abb. 4 : Abnahme der Albedo und Zunahme der Schneedichte in Funktion der Zeit

(aus HALL & MARTINEC, 1985)

Die Schneefälle korrelieren sehr stark mit dem Temperaturverlauf: Der Verlauf der 0°C-Isotherme in der freien Atmosphäre bestimmt, ob ein Niederschlag als Schnee oder Regen fällt. Schnee kann somit auch bei positiven Temperaturen an der Erdoberfläche fallen. Innerhalb eines Jahres variiert der Anteil der als Schnee gefallenen Niederschläge. Abb. 5 zeigt für die einzelnen Monate einer alpinen Messstation den prozentualen Schneeanteil am Niederschlag.

Mit zunehmender Höhe steigt der Anteil des Schnees am Gesamtniederschlag (Abb. 6). Diese Tatsache ist in zweierlei Hinsicht von Bedeutung: Erstens nimmt die Zuverlässigkeit von Niederschlagsmessungen mit zunehmendem Schneeanteil ab (zu tiefe Niederschlagsmesswerte) und zweitens beeinflusst der prozentuale Schneeanteil am Gesamtniederschlag gewisse Terme in der Energiehaushaltsgleichung (Kapitel 3.1.2.2.) und damit den Abfluss.

Die Schneeverteilung im Gelände wird massgeblich durch den Wind beeinflusst, teils während, teils nach der Ablagerung. Durch die Fallrichtung des Schnees werden verschiedene Hangexpositionen unterschiedlich befrachtet. Ueberall wo

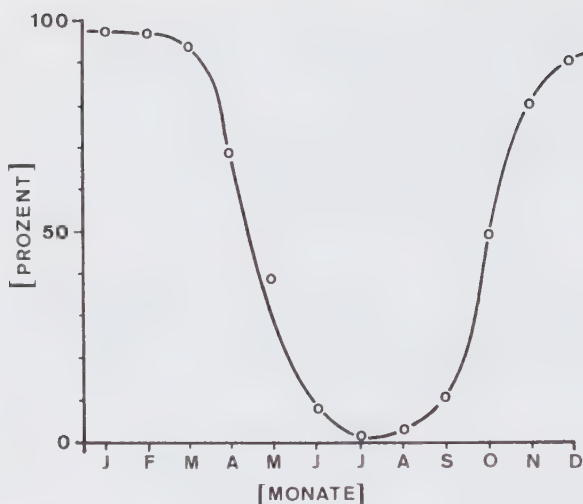


Abb. 5 : Mittlerer monatlicher Anteil der als Schnee gefallenen Niederschläge für die Messstation Davos (1588m ü.M.)

(nach KHR, 1978)

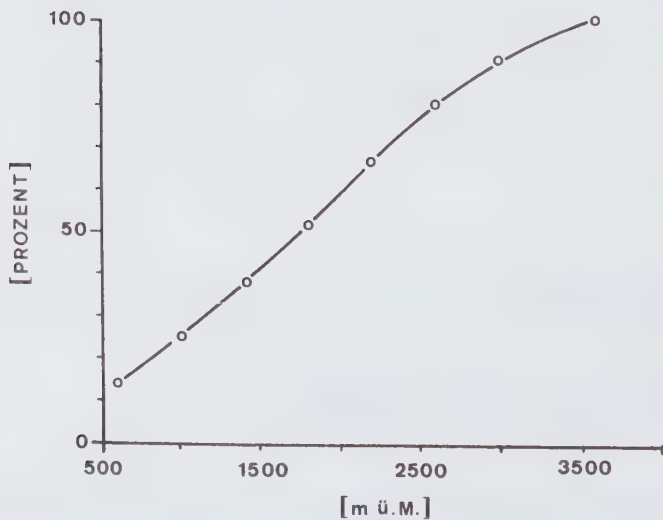


Abb. 6 : Mittlerer jährlicher Anteil der in den Alpen als Schnee gefallenen Niederschläge

(nach KHR, 1978)

die Windgeschwindigkeit vermindert wird (Mulden, hinter Kreten), lässt die Schleppkraft nach, so dass dort zusätzlich Schnee abgelagert wird.

Da der Niederschlag eine grosse räumliche und zeitliche Variabilität aufweist, sind zur genauen Erfassung der Niederschläge dichte Messnetze (Kapitel 5.4.) erforderlich. Von Interesse sind beim Niederschlag meistens nicht Werte an bestimmten Punkten, sondern für ganze Gebiete; daraus erwachsen besonders hohe Anforderungen an die Repräsentativität der Punktmessungen von Wetterstationen (MUELLER, 1985).

Da die repräsentative Messung des festen Niederschlags im Gebirge sehr schwierig ist, sollte sie wenn möglich nicht in extremen Lagen vorgenommen werden. Häufig sind die Messwerte vor allem wegen Windverfrachtungen mit Fehlern behaftet (JOSS & MUELLER, 1985).

Seitdem Schneebedeckungskarten aus Fernerkundungsdaten periodisch erhältlich sind, können Punktmessungen zur Bestimmung der räumlichen Verteilung der Schneedecke und ihrer zeitlichen Variation ergänzt oder ersetzt werden.

3.1.4.2. Auf- und Abbau der Schneedecke

In der Wintersaison wird durch wiederholte Schneefälle während Wochen und Monaten die Schneedecke aufgebaut. Der Aufbau erfolgt schrittweise, was eine Schichtung der Schneedecke zur Folge hat (Abb. 7).

Die Schichtung der Schneedecke entsteht durch niederschlagsarme Perioden mit kurzfristigen Temperaturanstiegen. Die Muster der Schneeakkumulation variieren von Jahr zu Jahr; so kann zum Beispiel das Maximum der Schneehöhe bereits im November oder aber erst im Februar erreicht werden. Das Wasseräquivalent von Schnee bei einem November-Maximum ist wegen der unterschiedlichen Schneedichte generell tiefer als dasjenige eines Februar-Maximums gleicher Höhe. Wegen des Temperaturgradienten (ca. -0.65°C pro 100m im Alpenraum) verläuft die Schneeakkumulation in verschiedenen Höhenzonen nicht gleichzeitig. Es ist demzufolge nicht möglich, für ein Einzugsgebiet ein genaues Datum für das Maximum der Schneeakkumulation anzugeben. Während in tieferen Lagen bereits die Ausaperung begonnen hat, kann in grösseren Höhen noch

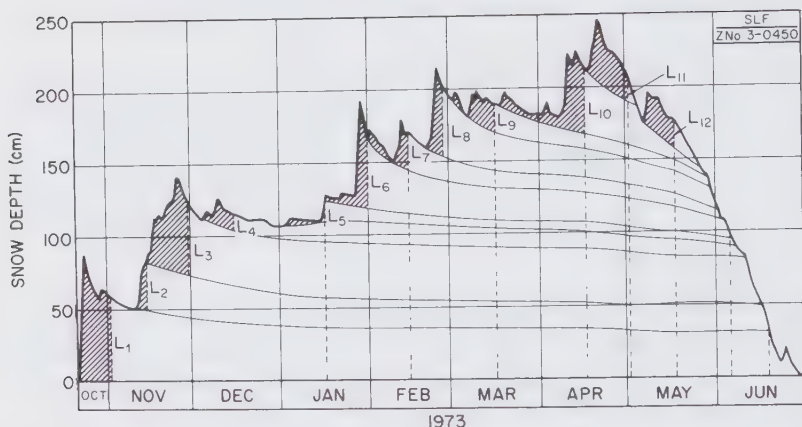


Abb. 7 : Ablagerung von 12 aufeinanderfolgenden Schneeschichten während der Akkumulation der Schneedecke (Weissfluhjoch, 2540m ü.M., 1973)

(aus MARTINEC, 1984)

Schnee akkumuliert werden. Alle Vorgänge sind stark expositionsabhängig: So wird der Abbau an Südexpositionen, die Akkumulation hingegen an Nordost- bis Südosthängen der Alpennordseite begünstigt.

Die mittlere Dauer der Schneedecke hängt nicht nur von der Höhe des betrachteten Einzugsgebietes und damit der Temperatur ab, sondern auch von der Exposition zur Sonne, der Steilheit und der Rauigkeit des Geländes, sowie der Lawinentätigkeit. Die Unterschiede der Schneegrenze zwischen Nord- und Südhängen können mehrere 100m betragen. Durch diese Einflüsse bedingt, kann keine eigentliche Schneegrenze definiert werden, wie sie in Gebieten mit einfacheren topographischen Verhältnissen etwa vorkommt. Ueber weite Gebiete kann die Schneedecke durch apere Zonen aufgelockert sein. Die Grenze des "Ewigen Schnees" (ganzjährige Schneedecke) liegt im schweizerischen Alpenraum zwischen 2500 und 2800m ü.M. (LAUFER, 1977).

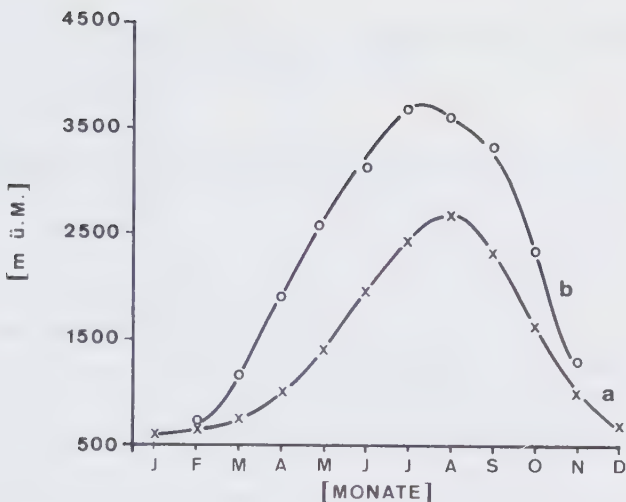


Abb. 8 : Mittlere monatliche Höhe der Schneegrenze (a) und der 0°C-Isotherme (b) im Hinterrheintal

(nach LAUFER, 1977)

Schneesmelzerscheinungen an der Oberfläche sind während des ganzen Winters möglich. In Lagen über 1500m ü.M. wird die Schneedecke aber kaum je völlig durchnässt, weswegen vorerst kein Abfluss feststellbar ist. Die mittleren Januartemperaturen liegen im Alpenraum in den untersten Lagen bei 0°C bis -2°C; schon gegen Ende Februar beginnt dort der Schnee zu schmelzen. Diese Gebiete sind aber flächenmässig sehr gering, weshalb sie keinen grossen Beitrag zum Abfluss liefern. Mit zunehmender Höhe verschiebt sich der Beginn der Schneesmelze gegen den Sommer hin. Mit dem steigen der 0°C-Isotherme in der freien Atmosphäre apert das ganze Einzugsgebiet nach und nach aus (Abb. 8). Bei einer Modellierung der Schneesmelze muss aber berücksichtigt werden, dass die Schneedecke häufig nicht allmählich aus tieferen Lagen nach oben ausapert. Bedingt durch verschiedene Ursachen wie Relief (Einstrahlung), Vegetation und Lawinen, kann die Ausaperung gleichzeitig an mehreren Stellen in verschiedenen Höhenzonen beginnen.

Im Frühling wird der Abbau durch Kälterückfälle oft unterbrochen. Im Juli und August erreicht die 0°C-Isotherme ihren Höchststand auf ca. 3700m ü.M..

In dieser Zeit verliert dann auch die Schneeschmelze an Bedeutung für den Abfluss; der Niederschlag wird den Hauptanteil am Abfluss liefern.

3.2. Landsat-MSS- und NOAA/AVHRR-Multispektraldaten zur Schneekartierung

3.2.1. Einführung

Satellitendaten sind geeignet für langandauernde, periodische Beobachtungen, Ueberwachungen und Kartierungen von grossen und abgelegenen Gebieten (DEY, 1984). Für die Bestimmung der Schneefläche und ihrer saisonalen Variationen eignen sich Sensorsysteme, die im sichtbaren und nahinfraroten Bereich des elektromagnetischen Spektrums arbeiten (RANGO, 1985a).

Die Daten einiger dieser Systeme sind relativ leicht erhältlich und finden bereits operationelle Anwendungen (RANGO, 1985c). Im Hinblick auf eine routinemässige Schneeflächenbestimmungen und von Abflusssimulationen bzw. -prognosen ist der leichte und schnelle Datenzugriff von besonderer Bedeutung.

Ebenso wichtig ist, dass der Datenfluss garantiert werden kann. Es muss also gefordert werden, dass Daten für ein bestimmtes Gebiet und für einen gewünschten Zeitpunkt kontinuierlich und rasch erhältlich sein müssen. Die Erfahrung hat gezeigt, dass heute noch kein System existiert, das alle Forderungen gleichzeitig erfüllen kann. Operationelle Anwendungen wie etwa Abflussprognosen können dadurch erschwert oder verunmöglicht werden. Es ist deshalb empfehlenswert, das Schema der Schneeflächenbestimmungen auf mehrere Satellitensysteme abzustützen.

Die Systeme Landsat-TM, Landsat-MSS, NOAA/AVHRR und Meteosat weisen die notwendige Kontinuität zur Schneeflächenbestimmung und mindestens teilweise geeignete Sensoren auf. Nicht alle dieser vier Systeme können jedoch für die Untersuchungen eingesetzt werden: Landsat-TM-Daten waren zu Beginn der Arbeit noch nicht erhältlich und für Meteosat-Daten ergeben sich systembedingt Einschränkungen: Die Aufnahmen des geostationären Meteosat-Systems zeigen für die Schweiz im besten Fall eine Auflösung von 2.5km x 2.5km pro Bildpunkt. Dies ist für Schneekartierungen im alpinen Raum zu grob, weshalb diese Daten für die weiteren Untersuchungen nicht in Betracht kommen.

3.2.2. Eignung von Landsat-MSS- und NOAA/AVHRR-Daten zur Schneekartierung

3.2.2.1. Sensorvergleich

Der Multispektral-Scanner (MSS) wurde bis heute auf den fünf amerikanischen Landsat-Satelliten eingesetzt. Die von der Erdoberfläche reflektierte Strahlung wird gleichzeitig in vier Spektralbereichen (Tab. 1) registriert. Das nominale momentane Gesichtsfeld (Instantaneous Field of View: IFOV) für jeden Sensor der Kanäle 4, 5, 6 und 7 beträgt 79m. Landsat weist einen sonnensynchronen Orbit auf und registriert die Daten von Norden nach Süden. Derselbe Bildausschnitt wird von Landsat 1-3 alle 18, und von Landsat 4 und 5 alle 16 Tage zur gleichen Ortszeit aufgenommen. Weitere systemspezifische Einzelheiten sind im "LANDSAT DATA USERS HANDBOOK" (1980) enthalten.

Empfangsstationen für Landsat-MSS-Daten, deren Reichweite den Alpenraum abdecken, befinden sich in Fucino (Italien) und Kiruna (Schweden) und werden von EARTHNET, einem Zweig der European Space Agency (ESA) betrieben.

Die NOAA-Satelliten (National Oceanographic and Atmospheric Administration) kreisen in einem fast polaren, sonnensynchronen Orbit, ähnlich wie Landsat. Das AVHRR-System (Advanced Very High Resolution Radiometer) weist wegen seines grossen Abtastwinkels (Field of View: FOV) von 110.8° den grossen Vorteil auf, einen Streifen von etwa 3000km Breite (West-Ost) erfassen zu können. Durch die Breite des abgetasteten Streifens und die Erdkrümmung entstehen dagegen am Rande einer Aufnahme panoramische Verzerrungen. Das räumliche Auflösungsvermögen beträgt nahe der Subsattelitenspur (Nadirlinie) $1100\text{m} \times 1100\text{m}$ (Tab. 1). Der Vorteil von NOAA ist seine hohe zeitliche Auflösung: Er überfliegt dasselbe Gebiet zweimal täglich. Die Wahrscheinlichkeit, eine wolkenfreie Aufnahme zu erhalten, steigt damit natürlich erheblich, verglichen mit dem 16- bzw. 18-tägigen Repetitionszyklus von Landsat.

Heute werden in den USA NOAA/AVHRR-Daten eingesetzt, um täglich Schneebedeckungskarten von verschiedenen Einzugsgebieten zu erstellen (DEY et al., 1983) und um monatlich die Schneebedeckung der nördlichen Hemisphäre zu kartieren (DEWEY & HEIM, 1981; RANGO, 1985a).

Die in dieser Arbeit verwendeten NOAA/AVHRR-Daten wurden von den Empfangs-

Tab. 1 : Technische Angaben zu den Systemen Landsat-MSS und NOAA/AVHRR

System	Spektralbereich	räumliche Auflösung	Repetitions- rate
MSS	4: 0.50- 0.60	79m x 79m	18 Tage für Landsat 1-3
	5: 0.60- 0.70		
	6: 0.70- 0.80		16 Tage für Landsat 4,5
	7: 0.80- 1.10		
NOAA/ AVHRR	1: 0.55- 0.68	1100m x 1100m	12 Stunden
	2: 0.73- 1.10		
	3: 3.55- 3.95		
	4: 10.50-11.50		
	5: 11.50-12.50		

stationen der Universität Bern und derjenigen der Deutschen Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt (DFVLR) in Oberpfaffenhofen (Deutschland) aufgenommen und zur Verfügung gestellt. Es muss aber darauf hingewiesen werden, dass für das Untersuchungsgebiet Rhein-Felsberg erst ab 1984 regelmäßig Daten erhältlich sind.

Die vier Spektralkanäle von Landsat-MSS zwischen 0.5µm und 1.1µm und die beiden ersten Kanäle von NOAA/AVHRR liegen innerhalb des für Schneekartierungen geeigneten Bereichs. Wie TOWNSHEND & TUCKER (1981) festhalten, besteht zwischen den MSS- und AVHRR-Kanälen eine gute Korrelation, weshalb die Schneeauswertungen direkt vergleichbar werden:

MSS-Kanal 5 korreliert mit AVHRR-Kanal 1

MSS-Kanal 7 korreliert mit AVHRR-Kanal 2

Konsequenterweise werden in der Folge für Schneekartierungen die MSS-Kanäle 5 und 7 sowie die AVHRR-Kanäle 1 und 2 verwendet.

Offensichtlich ist die Bestimmung der Schneegrenze in rauhem, zerklüftetem Terrain schwieriger als in wenig coupiertem, flachem Gelände. Die Schneegrenze erscheint in solchem Gelände nicht als Linie, sondern ist entsprechend stark strukturiert. Zur exakten Schneeflächenbestimmung ist deshalb ein räumlich relativ fein auflösendes Sensorsystem erforderlich. Um ein Mass für die Genauigkeit der Schneeflächenkartierung zu erhalten, muss eine Beziehung zwischen der Auflösung eines Systems und der räumlichen Verteilung

der Schneedecke gefunden werden. Verglichen werden die beiden Systeme MSS und AVHRR.

Die Heterogenität einer topographischen Fläche kann durch die Reliefenergie beschrieben werden. Dies ist die Modulation der Höhe in einem Einzugsgebiet oder einem Teil davon. Liegt, wie in unserem Fall, ein Digitales Gelände-Modell (DGM) vor, dann lässt sie sich leicht berechnen als Varianz (Energie) der Höhe h_i :

$$\sigma^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (h_i - \bar{h})^2$$

wobei N = Anzahl Pixel einer Fläche
 $\bar{h}$ = Mittlere Höhe
 σ^2 = Reliefvarianz

Im Einzugsgebiet Rhein-Felsberg (Kapitel 5.) vergleichen wir diese Reliefenergie für:

- einen typisch flachen Gebietsausschnitt
- einen typisch coupierten Gebietsausschnitt
- das gesamte Einzugsgebiet

Um den Einfluss der räumlichen Auflösung eines Sensorsystems abzuschätzen, kann darüberhinaus die Reliefabweichung σ für verschiedene Pixelgrößen berechnet werden. Die Resultate sind in Abb. 9 zusammengefasst und können wie folgt interpretiert werden: Wenn wir als Grenzwert eine Reliefabweichung von z.B. $\sigma = \pm 50\text{m}$ akzeptieren, dann können flache Gebiete mit einer Sensorauflösung von ungefähr $1500\text{m} \times 1500\text{m}$ abgetastet werden. Um Resultate mit vergleichbarer Genauigkeit zu erhalten, sollte coupiertes Gelände mit $120\text{m} \times 120\text{m}$ aufgenommen werden.

In coupiertem Gelände wurde für eine Pixelgröße von $1000\text{m} \times 1000\text{m}$ eine "Relief Abweichung" von $\sigma = \pm 140\text{m}$ ermittelt. Für eine Evaluation der Schneedecke ist in diesem Gelände eine Höhenmodulation von 560m angebracht. Es ist deshalb nicht sinnvoll, eine Unterteilung des Einzugsgebietes in Höhenzonen

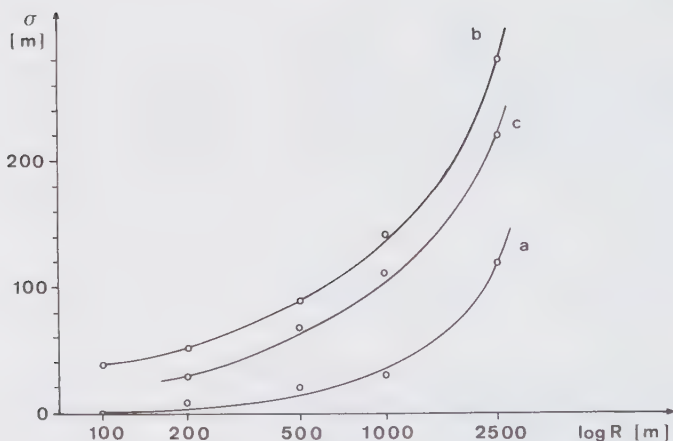


Abb. 9 : Reliefabweichung (σ) in Funktion der räumlichen Sensorauflösung (R)

- a) für flache Gebiete
- b) für coupierte Gebiete
- c) für gesamtes Einzugsgebiet

feiner als 500m einzuführen (Kapitel 4.3.1.). Um die Schneeflächen präziser zu bestimmen, müsste man eine Reliefabweichung von $\sigma = \pm 50\text{m}$ wählen, was einer optimalen Auflösung in diesem Gelände von 200m x 200m entspricht.

Aus diesen Überlegungen wird ersichtlich, dass der AVHRR-Scanner für die alpine Topographie kein optimales Auflösungsvermögen aufweist. Bei der Kartierung der Schneedecke müssen deshalb gewisse Ungenauigkeiten in Kauf genommen werden (Kapitel 6.9.2.).

Neben dem Auflösungsvermögen spielt für die Genauigkeit der Schneeauswertungen auch die minimale Grösse des auszuwertenden Gebietes eine Rolle. RANGO et al. (1984) und RANGO (1985c) stellen fest, dass mit NOAA/AVHRR-Daten digitale Auswertungen von Testflächen grösser als 200km² durchgeführt werden können. Wie sich im Verlauf der Untersuchung zeigt, muss für digitale

Schneeflächenbestimmungen mit AVHRR-Daten in alpinem Gelände eine minimale Gebietsgrösse von ca. 600km² gefordert werden (Kapitel 7.4.2.). Aus statistischen Gründen werden in multispektralen Analysen eine minimale Anzahl Pixel gebraucht. Zusätzlich zur Gebietsgrösse spielt auch die prozentuale Schneebedeckung eine wichtige Rolle: Bei geringen Schneebedeckungen (<20%) können die Evaluationen nicht mit derselben Genauigkeit durchgeführt werden wie bei hohen (Kapitel 6.9.2., 6.10.1.).

Weder mit den Sensoren des Landsat-MSS noch des NOAA/AVHRR ist es möglich, durch die Wolken hindurch die Schneebedeckung zu kartieren. Die automatische Trennung zwischen schneebedeckten und bewölkten Bildteilen ist prinzipiell mit den thermalen NOAA/ AVHRR-Kanälen 3 und 4 (Tab 1 und Kapitel 6.4.5.2.) möglich. In Kapitel 6.4.5.1. wird ein leicht zu handhabendes Verfahren zur Wolkenmaskierung und in Kapitel 6.8. eine Methode zur Bestimmung der Schneebedeckung in bewölkten Regionen vorgestellt.

3.2.2.2. Aufnahmezyklus

Für die präzise Bestimmung der Schneeflächenveränderung und die Herleitung von Schneebedeckungskurven sind während einer Ausaperungsperiode Satelliten-aufnahmen so häufig wie möglich, am besten jedoch einmal wöchentlich, notwendig (MARTINEC, 1982).

Wegen der Repetitionsrate von 16 bzw. 18 Tagen (Tab. 1) sind Landsat-MSS-Daten nicht häufig genug erhältlich. Zusätzlich verhindert im Frühjahr starke Bewölkung oft die Verwendung der Daten, so dass die Zahl der verwendbaren Aufnahmen zusätzlich reduziert wird. Von "garantierter Information", wie es ein Simulations- oder Prognoseverfahren benötigt, kann in einem solchen Fall nicht mehr gesprochen werden.

Erst durch die Ergänzung der MSS-Auswertungen mit AVHRR-Aufnahmen kann dieser Engpass überwunden werden. Einer der beiden NOAA-Zyklen fällt in die Nachtstunden und kann für Schneekartierungen nicht verwendet werden. Zur Schneeflächenbestimmung in alpinen Gebieten sollten besonders bei Inversionslagen keine Sensoren im Bereich des thermalen Infrarot verwendet wer-

den. "Die Temperatur der Erdoberfläche steht nicht unbedingt in direktem Zusammenhang mit der Schneebedeckung, oft wirkt sich die Temperaturabnahme mit der Höhe stärker aus als Temperaturunterschiede zwischen schneebedecktem und schneefreiem Gebiet" (ROTT, 1978).

Eine weitere Einschränkung ergibt sich durch die panoramische Verzerrung: Bedingt durch die Bahnparameter von NOAA befindet sich die Nadirlinie bei jedem erneuten Ueberfliegen des Einzugsgebietes etwas weiter westlich. Wenn das Einzugsgebiet zu weit weg von der Nadirlinie zu liegen kommt, nimmt die Pixelgrösse stark zu, eine detaillierte Auswertung der Daten ist nicht mehr möglich. Wenn nur Szenen mit geringer panoramischer Verzerrung (innerhalb eines FOV von $\pm 20^\circ$) für die Evaluationen berücksichtigt werden heisst dies, dass nur jede zweite Aufnahme (also 15 Aufnahmen pro Monat) von NOAA für die Schneekartierung verwendet werden kann. Diese Anzahl wird durch Bewölkung, besonders während der Monate April und Mai, nochmals drastisch reduziert. Gerade in den beiden Monaten der grössten Schneeflächenverminderung wären aber möglichst häufig Aufnahmen notwendig, um die Abnahme der Schneedecke präzise messen zu können. Im optimalen Fall kann mit drei bis vier, im Normalfall mit ein bis zwei Aufnahmen pro Woche gerechnet werden.

Werden Landsat-MSS- und NOAA/AVHRR-Daten zu einer kombinierten Auswertung beigezogen, ist es möglich, das dreiwöchige Intervall zwischen zwei Landsat-MSS-Aufnahmen mit NOAA/AVHRR-Bildern zu ergänzen, d.h. es steht mindestens jede Woche ein Bild zur Verfügung. Dies gilt allerdings nicht für länger anhaltende Schlechtwetterperioden, wie etwa im Frühjahr 1986, als während ca. zwei Monaten kein AVHRR-Bild die aufgestellten Bedingungen zu erfüllen vermochte.

3.2.3. Schneekartierungen mit Landsat-MSS- und NOAA/AVHRR-Daten

Seit die ersten Satellitendaten erhältlich sind, werden am Geographischen Institut der Universität Zürich in Zusammenarbeit mit dem Institut für Kommunikationstechnik (ETHZ) Verfahren zur Auswertung von Satellitendaten entwickelt und verbessert sowie an praktischen Beispielen getestet (HAEFNER, 1979; ITTEN, 1980). Arbeiten von GFELLER (1975), URFER (1978) und KELLER

(1981 und 1987) erarbeiteten ein Konzept zur digitalen Schneeflächenbestimmung mit Landsat-MSS-Daten. BURKART (1986) verglich Schneeflächenevaluationen basierend auf NOAA/AVHRR-Daten mit solchen von MSS-Auswertungen. JAEGLI (1987) stellte einen Vergleich zwischen digital und analog ausgewerteten AVHRR-Daten an. Ziel dieser Studien war es, die notwendigen Bildverarbeitungsalgorithmen zur Verfügung zu stellen und die technischen Verfahren zu entwickeln, die eine möglichst routinemässige Verarbeitung auch grösserer Bildserien erlauben (KELLER, 1987).

Die bei den Auswertungen entstehenden Schneebedeckungskarten können verschiedenen Verwendungszwecken dienen: Durch Ueberlagern mehrerer Schneebedeckungskarten einer Saison können z.B. die dynamischen Veränderungen der Schneedecke erfasst und Ausaperungskarten erstellt werden. Für einen multidisziplinären Vergleich werden diese Karten zusammen mit andern Daten in einem Geographischen Informations-Systems (GIS) gespeichert. Eine kombinierte Auswertung dieser Daten ermöglicht Aussagen über die Auswirkungen der Schneedecke auf Flora, Fauna, Böden und Landnutzung (KELLER & SEIDEL, 1984; KELLER, 1987; WILDI & EWALD, 1986).

Aufbauend auf der dazu entwickelten Methodik werden in dieser Untersuchung erstmals Satellitendaten mehrerer Systeme periodisch für ein relativ grosses Gebiet (3249km²) digital verarbeitet. Die grossräumige Simulation des Schmelzwasser-Abflusses, basierend auf digital ausgewerteten Satellitendaten, stellt eine Neuerung bei der Verwendung von Fernerkundungsdaten dar. Er bedeutet ein weiterer Schritt auf dem Weg zur operationellen und praxisbezogenen Anwendung der Fernerkundung.

3.3. Methoden zur Verarbeitung digitaler Landsat-MSS- und NOAA/AVHRR-Daten

Die Schneeflächenmessungen, basierend auf multispektralen Landsat-MSS- und NOAA/AVHRR-Daten, erfolgt rein numerisch unter Verwendung von Methoden der digitalen Bildverarbeitung (Image Processing) und der Mustererkennung (Pattern Recognition). Der Uebersicht halber wird in diesem Kapitel eine kurze

theoretische Abhandlung über die notwendigen Schritte bei der Verarbeitung digitaler Satellitenbilder gegeben (Kapitel 3.3.1. und 3.3.3.) und einige Aspekte der geometrischen Korrekturen für MSS- und AVHRR-Daten behandelt (Kapitel 3.3.2.). Im letzten Teil erfolgt eine Beschreibung der verwendeten Hard- und Software (Kapitel 3.3.4.).

3.3.1. Möglichkeiten der digitalen Satellitenbildverarbeitung

Bei statistischen Klassifikationsverfahren wird jeder Bildpunkt (Pixel) durch einen Satz von Merkmalen (Spektralkanäle) charakterisiert, d.h. jeder Messwert wird durch einen Merkmalsvektor repräsentiert, dessen Komponenten den Intensitätswerten der einzelnen Kanäle entsprechen. Die Klassifikation der Messwerte wird vollzogen, indem der Merkmalsraum (Feature Space), basierend auf der Verteilung der Merkmalsvektoren, unterteilt wird.

Jedes Pixel wird also entsprechend seiner spektralen Eigenschaften nach bestimmten statistischen Kriterien klassifiziert. Die räumlichen Beziehungen benachbarter Pixel brauchen in diesem Fall nicht in Betracht gezogen zu werden, da im Falle von Schneekartierungen sich die zu klassierenden Objekte spektral deutlich unterscheiden und die multispektrale Information zumeist ausreicht, um befriedigende Klassifikationsresultate zu erzielen.

Die Resultate derartiger statistischer Klassifikationsmethoden zeigen, zu welcher Kategorie jedes Pixel in einem Bild gehört, können aber keine Informationen über andere Eigenschaften der Objekte einer Szene geben. Bekanntes Wissen über Objekteigenschaften, wie Form, Grösse und Lage sowie syntaktische und semantische Beziehungen mit andern Objekten werden dazu nicht benötigt (NAGAO & MATSUYAMA, 1980).

Neue Lösungsansätze lehnen sich stark an die Art an, wie der Mensch ein Bild analysiert. Im Gegensatz zu Standardklassifikationen, bei denen die Analyse auf den multispektralen Eigenschaften einzelner Pixel beruht, werden bei strukturellen Analysen (NAGAO & MATSUYAMA, 1980; GERIG & SEIDEL, 1984) à-priori-Wissen über die Kategorien in die Auswertung miteinbezogen. Die Pixel werden nicht mehr isoliert, sondern im Zusammenhang (Kontext) mit ihrer Umgebung beurteilt.

Bei der multispektralen Analyse digitaler Satellitendaten werden nach FU & ROSENFELD (1976) und HARALICK (1976) folgende Schritte unterschieden:

- 1) Die Vorverarbeitung der gemessenen Werte: Sie beinhaltet Schritte wie radiometrische und geometrische Korrekturen, Mosaikierung, Umformatieren, Restauration von Bildteilen etc.
- 2) Die Selektion von Merkmalen, wobei zwei Vorgehen unterschieden werden können:
 - a) Transformation des Merkmalsraums zur Erhöhung der Klassentrennbarkeit:
 - lineare (kanonische) Transformationen, wie z.B. die Fisher Discriminant Analysis (FISHER, 1936)
 - nicht-lineare, modellgestützte Transformationen, wie z.B. Ratiobil-
dung
 - b) Redundanz-Reduktion: Multispektrale Bilder besitzen oft redundante Information, da benachbarte Spektralkanäle stark korrelieren können. Merkmalsselektion kann in diesem Fall bedeuten, eine geeignete Auswahl aus den vorhandenen Kanälen zu treffen oder neue Kanäle auszuwählen, die sich mittels Hauptkomponenten-Analyse als Linear-Kombination der alten ergeben.
- 3) Klassifikation der Messwerte: Der Vorgang kann entweder mit nicht-überwachten oder mit überwachten Verfahren durchgeführt werden. Es werden jeweils zwei Schritte unterschieden:
 - Lernen: Stichprobenauswahl und Bestimmen des zu verwendenden Klassifikationsalgorithmus (Decision Rule) aufgrund von Lernstichproben. Unüberwachte Verfahren gruppieren die Pixel nach einer ihnen eigenen Strategie (Clustering). Hier besteht die Schwierigkeit, für die "gefundenen" Gruppen anschliessend die entsprechenden Objekte (Gruppen) zu identifizieren und zu benennen.
 - Zuordnen: Basierend auf obigen Bedingungen werden alle Pixel der ihnen entsprechenden Kategorie zugeordnet.

Die Resultate der multispektralen Analyse sind im Normalfall thematische Karten und flächenstatistische Angaben, deren inhaltliche Aussagen je nach Verwendungszweck weiteren Auswertungen unterzogen werden können.

Im anschliessenden Kapitel folgt die Besprechung einiger Verarbeitungsschritte, die für die Untersuchung von besonderer Bedeutung sind. Eine detaillierte Diskussion des theoretischen Vorgehens ist bei DUDA & HART (1973) und des praktischen Vorgehens bei SCHOWENGERDT (1983) zu finden.

3.3.2. Die Geokodierung

Um mehrere Satellitenbilder miteinander vergleichen zu können ist es nötig, sie auf eine gemeinsame Kartenprojektion zu beziehen (Geokodierung). Die räumliche Lage jedes Pixels ist dadurch eindeutig definiert. Die Feststellung von Veränderungen an der Erdoberfläche und flächenstatistische Aussagen, der Vergleich von Bildern verschiedener Sensorsysteme sowie die Ueberlagerung mit anderen Daten werden erst durch die Geokodierung möglich.

Nach STEINER et al. (1972) gibt es vier Hauptfehlerquellen, die sich auf die Geometrie von Fernerkundungsdaten auswirken:

- Objektbedingte Fehler (Erdrotation = Skew, Erdkrümmung, Relief, Atmosphäre)
- Plattformbedingte Fehler (Lageveränderungen während einer Aufnahme, Änderung der Flughöhe, Änderung der Fluggeschwindigkeit)
- Sensorbedingte Fehler (panoramische Verzerrung, variable Scangeschwindigkeit)
- Verarbeitungsbedingte Fehler

Ueber plattformbedingte Fehler wird hier nicht gesprochen, da systemkorrigierte Daten vorliegen, d.h. die Aufnahmen werden von den Bodensationen radiometrisch und geometrisch vorverarbeitet. Auch verarbeitungsbedingte Abweichungen werden nicht näher untersucht. Da die Schneeverteilung von Interesse ist, spielt die absolute Lage einzelner Objekte in dieser Arbeit eine untergeordnete Rolle. Im Verlauf der weiteren Untersuchungen werden nur noch

objekt- und sensorbedingte Fehler berücksichtigt, da diese sich massgeblich auf die Resultate und deren weitere Verwendbarkeit auswirken.

3.3.2.1. Geometrische Transformation von Landsat-MSS-Aufnahmen

Systematische geometrische Verzerrungen werden bei Landsat-MSS-Daten durch die Erdrotation während des Abtastvorganges (Skew), durch nicht-lineare Scan-Spiegelbewegungen und durch nicht-polaren Orbit des Satelliten verursacht. Die Ursachen dieser Verzerrungen sind bekannt und können in deterministischer Art und Weise korrigiert werden.

Die verbleibenden Verzerrungen können mit Hilfe der Passpunktmethode und mathematischen Entzerrungsmodellen beseitigt werden:

Die Transformation von Satelliten- in Kartenkoordinaten erfolgt aufgrund einer affinen Rückwärts-Transformation wie sie von KIRBY (1975) vorgeschlagen wurde. Bei einer Rückwärts-Transformation werden den Koordinatenpaaren aller Gitterpunkte der Karte die entsprechenden Pixelwerte aus dem Satellitenbild zugeordnet. Die affine Koordinatentransformation setzt sich aus einer Drehung und einer Streckung zusammen, ist linear und im hier angewendeten Fall zweidimensional.

In einem ersten Schritt werden die Koeffizienten für die affine Transformation aus den x- und y-Koordinatenpaaren von Passpunkten in Karte und Bild hergeleitet. Es werden mehr Koordinatenpaare gewählt als notwendig sind. Dadurch entsteht ein überbestimmtes Gleichungssystem, das mit Hilfe der Ausgleichsrechnung gelöst wird. Die dabei auftretenden Residuen sind ein Mass für die Güte der verwendeten Passpunkte. Die Residuen geben die Abweichung der Passpunktkoordinaten von den Sollwerten an. Wird diese Abweichung grösser als 1 Pixel, sollte der betreffende Passpunkt verworfen werden. Es kann jedoch vorkommen, dass in einer Region nur gerade dieser eine Passpunkt aufzufinden ist. Obwohl die Residuen nicht optimal sind, scheint es in diesem Falle angebracht, den Passpunkt weiterzuverwenden, um noch grössere Verzerrungen in diesem Bildteil zu verhindern. Nebst den Residuen wird auch der Standardfehler (Root Mean Square) aller Passpunkte bestimmt.

Im zweiten Schritt werden die Satellitenbilder basierend auf den berechneten Koeffizienten mittels der affinen Koordinatentransformation numerisch mit dem Referenzkoordinatensystem registriert. Gleichzeitig mit der Aenderung der Abbildungsgeometrie wird in der Regel auch die Rasterweite des Outputbildes neu gewählt (Resampling), damit die Einheiten z.B. besser mit der Landeskarte harmonisieren. Bei den Landsat-Bildern, die im Original mit 56m x 79m vorliegen, wählt man neu etwa 100m x 100m.

Bei Rückwärts-Transformationen werden die Bildpunktmitten des Outputbildes in der Regel nicht genau auf Zentren von Pixel des Inputbildes abgebildet. Daher müssen die Grauwerte (Videowerte) für das Outputbild neu zugewiesen werden, was mit mehreren Methoden möglich ist (Interpolation):

Die einfachste Methode der Grauwertzuweisung ist das Nearest- Neighbour-Verfahren (nächster Nachbar). Bei diesem Verfahren wird für den Videowert jedes neuen Pixels im Outputbild der Wert des nächsten Originalpixels gewählt. Grosser Vorteil dieser Methode ist, dass keine neuen Grauwerte generiert werden. Nur Werte, die auch im Inputbild vorkommen, werden ins Outputbild übertragen. Es liegt in der Natur dieser Methode, dass einzelne Pixel verloren, andere hingegen verdoppelt werden.

Für die bilineare Interpolation werden die vier umliegende Inputpixel benötigt. Die Grauwerte von jedem der vier Pixel werden entsprechend ihrem reziproken Anteil an der Fläche des Outputpixels gewichtet. Es ist offensichtlich, dass dabei Extremwerte ausgeglichen werden, d.h. das Bild verliert an lokalem Kontrast. Zusätzlich werden neue Videowerte generiert, die im Originalbild nicht vorkommen.

Bei der kubischen Interpolation (Cubic Convolution) werden neben den vier umliegenden Pixeln auch noch die 12 umhüllenden Pixel berücksichtigt. Entlang von Kanten entstehen sogenannte "Grauwert-Overshoots", was einen schärferen Bildeindruck hinterlässt.

Die bei der bilinearen und kubischen Interpolation entstehenden Bilder wirken optisch zwar besser, doch ist bei einer weiteren Auswertungen Vorsicht geboten. Durch die erwähnten Veränderungen der Videowerte können Schwierigkeiten bei der Erkennung feiner Details oder bei der Stichprobenauswahl für

überwachte Klassifikationsverfahren (Kapitel 3.3.3.) auftreten. Auch können bei Farb- und Falschfarbendarstellungen der Multispektraldaten irreführende Farbverschiebungen auftreten. Das Nearest-Neighbour-Verfahren wird hier deshalb der bilinearen und der kubischen Interpolation vorgezogen.

3.3.2.2. Geometrische Transformation von NOAA/AVHRR-Aufnahmen

Bei NOAA/AVHRR-Daten stellen sich durch den grossen Scanwinkel von 110.8° zusätzliche Probleme, die bei Landsat-Daten vernachlässigt werden können. Die bei FREI (1984) im Detail besprochene panoramische Verzerrung hat eine zunehmend deformierte Abbildung von Objekten zur Folge, je näher sie sich am westlichen und östlichen Bildrand befinden. So wird etwa ein kreisförmiger Gegenstand als Ellipse abgebildet. Die Verzerrungen werden durch die Grösse des Abtastwinkels und die Erdkrümmung verursacht und lassen sich, da sie systematisch sind, relativ leicht korrigieren.

In Abb. 10 wird die geometrische Auflösung entlang einer Scanlinie mit und ohne Berücksichtigung der Erdkrümmung gezeigt. Im Nadirbereich ($\pm 20^\circ$) ist der Verlauf der beiden Kurven praktisch identisch, gegen die Ränder hin klaffen sie aber weit auseinander. Verglichen mit der Abbildung eines Objektes in der Nähe der Nadirlinie, wird ein solches bei einem Abtastwinkel von $\pm 40^\circ$ bereits doppelt so gross abgebildet. Bei einer Bildauswertung scheint es daher angebracht, sich auf einen Scanwinkel von höchstens $\pm 40^\circ$ zu beschränken, da ausserhalb dieses Bereichs die räumliche Auflösung in Scanrichtung $> 2.2\text{km}$ beträgt. Bis zu einem Scanwinkel von $\pm 20^\circ$ kann diese Verzerrung ($< 13\%$) vernachlässigt werden.

Zusätzlich muss auch der Skew, d.h. die Kompensation der Erdrotation während der Aufnahme, korrigiert werden. Da dieser Fehler von der geographischen Breite abhängt, ist die Funktion nicht linear. Folglich kann der Skew nur für kleine Bildausschnitte in N/S-Richtung durch eine affine Transformation kompensiert werden.

Anschliessend an die Korrektur der panoramischen Verzerrung und des Skews wird auch für NOAA/AVHRR-Daten eine affine Koordinatentransformation, beru-

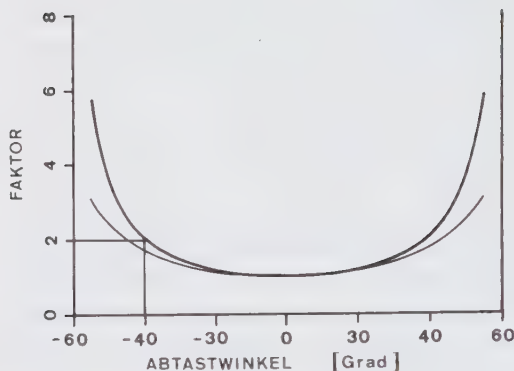


Abb. 10: Geometrische Auflösung entlang einer Scanlinie mit (oben) und ohne Berücksichtigung (unten) der Erdkrümmung

(nach FREI, 1984)

hend auf der Passpunktmethode, und ein Resampling durchgeführt (gemäss Kapitel 3.3.2.1.).

3.3.3. Multispektrale Klassifikation

3.3.3.1. Abgrenzung verschiedener Methoden

Für die geplanten Schneeflächenklassifikationen werden ausschliesslich überwachte Verfahren (Classification by Supervised Learning) eingesetzt (DUDA & HART, 1973). Bei überwachten Verfahren werden für jede gewünschte Kategorie mehrere repräsentative, möglichst homogene Flächen im Bild lokalisiert (Trainingsgebiete, Stichproben). Bei der Bestimmung dieser Stichproben benutzt der Interpret à-priori-Wissen z.B. aus Feldbegehungen, Luftbildinterpretationen oder anderen Quellen. Um das Gelernte auf den ganzen Datensatz anwenden zu können, muss die Stichprobe einer Kategorie das gleiche statistische Verhalten wie die Gruppe selbst aufzeigen. Ein wichtiger statistischer Aspekt ist, neben der Repräsentativität, die Verwendung einer genügend

grossen Anzahl von Stichproben pro Kategorie, damit die klassenspezifischen Eigenschaften genau abgeschätzt werden können. Parametrische Verfahren (siehe unten), die eine unimodale Verteilung voraussetzen, sollten eine minimale Anzahl von Stichproben pro Kategorie aufweisen, die etwa der 3- bis 10-fachen Merkmalsdimension entsprechen (HARALICK, 1976). Besonders wenn nur wenige Merkmale (Kanäle) verwendet werden, muss eine genügende Anzahl von Stichproben pro Kategorie erhoben werden (FOLEY, 1972). Die Repräsentanz von Stichproben ist jedoch wichtiger als deren Menge.

Die Zuweisung eines Merkmalsvektors zu einer bestimmten Kategorie basiert auf wahrscheinlichkeitstheoretischen Überlegungen und erfolgt aufgrund der Trainingsdaten. Bei diesen statistischen Klassifikationsverfahren lassen sich zwei Schemen unterscheiden, nämlich parametrische und nicht-parametrische Algorithmen.

Parametrische Verfahren setzen eine bestimmte statistische Verteilung der Grauwerte für jede Kategorie voraus, üblicherweise die Normalverteilung. Die Parameter (Mittelwert und Kovarianzmatrix) dieser Verteilung werden aus den Stichproben ermittelt und im Klassifikationsalgorithmus angewendet. Die Zuweisung eines Merkmalsvektors zu einer bestimmten Kategorie erfolgt z.B. aufgrund der grössten Mutmasslichkeit (Maximum-Likelihood).

Nicht-parametrische Verfahren (z.B. Density Slicing und Parallelepiped, Parzen-Window) erfordern keine bestimmte Wahrscheinlichkeitsverteilung und legen ein direktes Lernen des Klassifikationsgesetzes aus den Stichproben nahe.

3.3.3.2. Verwendete Klassifikationsalgorithmen

Im folgenden werden nur jene multispektralen Klassifikationsalgorithmen (SCHUERMANN, 1977) beschrieben, die auf parametrischen, überwachten Verfahren beruhen und die später für die Schneekartierung verwendet werden.

Dem Minimum-Distance-Klassifikator liegt der Gedanke zugrunde, dass Merkmale, die im Merkmalsraum nahe beeinanderliegen, wahrscheinlich zur selben Ka-

tegorie gehören. Als Distanzmass zweier Punkte im Merkmalsraum wird der Euklid'sche Abstand benutzt. Aufbauend auf diesem Distanzmass wird ein Merkmal derjenigen Kategorie zugeordnet, zu deren Schwerpunkt es den geringsten Abstand hat. Im Falle eines 2-dimensionalen Merkmalsraumes ist die Trennfunktion zweier Stichprobenkategorien die Mittelsenkrechte zwischen den beiden Zentren. Bei einem mehrdimensionalen Merkmalsraum sind die Trennfunktionen entsprechend Hyperebenen.

Der Maximum-Likelihood-Klassifikator basiert auf einem statistischen Ansatz. Die Trainingskategorien werden durch Verteilungs- oder Dichtefunktionen beschrieben, wobei angenommen wird, dass sie normalverteilt sind. Der geometrische Ort aller Bildpunkte, die von einer Trainingskategorie denselben Abstand (Mahalanobis-Distanz) haben, ist ein N-dimensionales Ellipsoid, im 2-dimensionalen Fall also eine Ellipse. Abb. 11 zeigt das Klassifikationsergebnis im Falle von 7 Kategorien. Es ist zu beachten, dass die Kovarianzmatrizen (Ellipsen) ungleiche Grössen und deren Hauptachsen unterschiedliche Richtungen aufweisen.

Ein Spezialfall des Maximum-Likelihood-Klassifikators stellt der Mahalanobis-Distanz-Klassifikator dar. Dabei werden folgende Einschränkungen festgelegt: Die Kovarianzmatrizen aller Stichprobenkategorien müssen identisch sein und deren Hauptachsen gleiche Richtung aufweisen, d.h. die Ellipsen besitzen alle dieselbe Ausrichtung und die gleiche Grösse (Abb. 11).

Aus der Literatur geht nicht hervor, welche Algorithmen für welche Problemstellung verwendet werden sollen. MURI (1981) verglich den Minimum-Distance- mit dem Maximum-Likelihood-Klassifikator für Schneekartierungen bei der Verwendung einer unterschiedlichen Anzahl Kategorien und Kanäle, doch zeigten sich keine eindeutigen Vorteile für einen der beiden Algorithmen. In der in Kapitel 6. beschriebenen Schneeflächenbestimmung wird hauptsächlich der Minimum-Distance-Klassifikator eingesetzt. Nur in Ausnahmefällen wird auch auf das Mahalanobis-Distance- oder Maximum-Likelihood-Verfahren zurückgegriffen. Die Entscheidung, wann welcher Algorithmus zum Einsatz kommt, ist von der Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung der einzelnen Kategorien abhängig. Voraussetzung für statistische Klassifikationsverfahren ist die Normalverteilung der Stichprobendaten. In der Natur zeigen jedoch die spektralen Messwerte vieler Objekte keine Normalverteilung, so dass die Klassifikationsre-

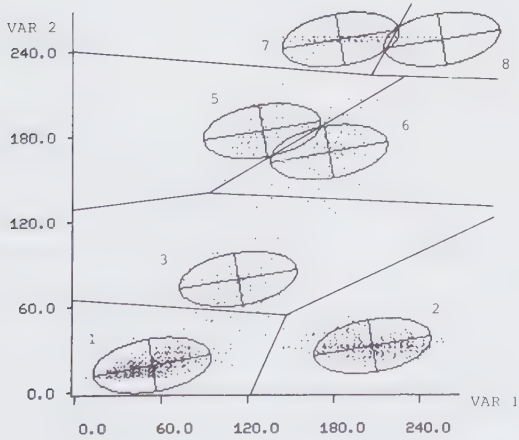
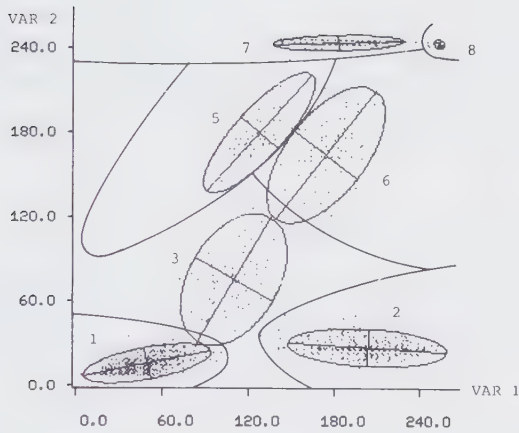


Abb. 11: Beispiel zum Maximum-Likelihood-Klassifikator (oben) und zum Mahalanobis-Distanz-Klassifikator (unten)

- | | |
|-------------------|---------------------|
| 1) Wald | 4) Uebergangszone |
| 2) Wiesen | (sonnenexponiert) |
| 3) Alpweiden | 7) Schnee (feucht) |
| 5) Uebergangszone | 8) Schnee (trocken) |
| (Schattenlage) | |

sultate auch entsprechend schlecht ausfallen, sobald mehrere solcher nicht-normalverteilter Kategorien vorkommen.

Das Resultat der multispektralen Klassifikation ist eine thematische Karten, aus der Angaben über den prozentualen Flächenanteil verschiedener Kategorien gemacht werden können (Kapitel 6.7.).

3.3.4. Verwendete Hard- und Software

Die Datenmenge, besonders bei den höher auflösenden Landsat-Satellitenbildern, ist enorm gross. Für die Verarbeitung von Satellitendaten werden deshalb leistungsfähige Rechen- und Bildverarbeitungssysteme benötigt.

Die vorliegende Arbeit wurde auf einer Anlage am Institut für Kommunikationstechnik an der ETH Zürich durchgeführt. Basis dieser Anlage bildet eine "VAX 11/780" von Digital Equipment Corporation (DEC), gekoppelt mit dem Bildverarbeitungssystem "IP8500" der Firma "Gould-DeAnza".

Zur Verfügung standen Arbeitsstationen mit je vier Speicherebenen à 512 x 512 x 8 bit, jede mit einem Farbmonitor ausgerüstet. Integraler Bestandteil des "IP8500" ist ein Digital Video Processor (DVP), der imstande ist, gewisse Operationen, wie z.B. geometrische und logische Operationen, sehr schnell auszuführen. Als Outputmöglichkeiten sind einerseits die Farbmonitore vorhanden, andererseits - wenn eine Hardcopy gewünscht ist - können Abbildungen auf einem Trommelscanner (Optronics-Photomation/ P1700) auf Film aufbelichtet werden. Eine besonders wichtige Stellung nehmen die Farbmonitore ein. Da aufwendige und langandauernde Arbeiten, wie Passpunktbestimmungen für die geometrische Transformation und die Stichprobenerhebungen für die überwachten Klassifikationen an diesen Monitoren ausgeführt werden müssen, wird an sie hohe Qualitätsansprüche gestellt.

Für die digitale Satellitenbildverarbeitung sind Programme aus zwei verschiedenen Softwarepaketen vorhanden, die beide am Institut für Kommunikationstechnik der ETH Zürich erstellt worden sind. Die "LIPS-plus"-Bibliothek (Library of Image Processing Software) beinhaltet Programme, welche die interaktive Bildverarbeitung an einer Arbeitsstation unterstützen (EGELI et

al., 1983). Für die Satellitenbildverarbeitung sind in der Bibliothek "PHOTOS" (SEIDEL, 1976) vorwiegend Programme zum Setzen von Lernstichproben, Wählen von Passpunkten, Kontrolle von Klassifikationsresultaten und Bildmaskierungsoperationen implementiert.

4. MODELLE ZUR SIMULATION DES SCHMELZWASSER-ABFLUSSES

Um die Schneeschmelze und den daraus resultierenden Abfluss simulieren bzw. prognostizieren zu können, müssen Schmelz- und Abflussvorgang modelliert werden. Simulationsmodelle eignen sich zur Nachbildung von Prozessabläufen. Bei der Modellierung werden Prozesse nachgeahmt, die sich in Wirklichkeit über grössere Zeiteinheiten erstrecken. Zum Zweck der Prognose können zielgerichtete Experimente vorgenommen werden, indem je nach Aufgabenstellung systematisch die Eingangsgrössen (Variablen wie Niederschlag, Temperatur, Verdunstung), Gebietseigenschaften (Bodenbedeckung, Bebauung), Modellparameter (Abflusskoeffizienten, Rezessionskoeffizienten usw.) oder die Bewirtschaftung wasserwirtschaftlicher Anlagen verändert werden. Solche Manipulationen ermöglichen das Studium und die szenenhafte Beschreibung von Prozessverläufen.

Wird die Wirkung hydrologischer Systeme im Modell nachgebildet, tritt das Problem der Bestimmung der entsprechenden Modellparameter auf. Dabei kann es generell nicht darauf ankommen, "alles" über das betrachtete System zu wissen und dieses in allen Einzelheiten nachzubilden. Vielmehr ist es notwendig, eine der praktischen Aufgabenstellung gerecht werdende Abstraktion vorzunehmen und die systemcharakteristischen Modellparameter mit vertretbarem Aufwand zu bestimmen.

An ein Abflussmodell können z.B. folgende Ansprüche gestellt werden:

- begrenzte Anzahl zu messender Variablen
- stabile Parameter, die nur wenig Anpassung erfordern
- Abklärung der Einflüsse von Landnutzungsänderungen
- etc.

Eine begrenzte Anzahl von Variablen und Parameter, die wenig Anpassung erfordern, vereinfacht die Handhabung eines Modells und trägt somit zur schnellen Verarbeitung der Daten bei. Gerade in Hinsicht auf Abflussprognosen müssen die notwendigen Daten sehr rasch zur Verfügung stehen. Die Datenverarbeitung bietet im allgemeinen keine Probleme, beansprucht aber je nach Modell sehr viel Rechenzeit.

Ein Schneeschmelz-Abflussmodell besteht in der Regel aus zwei Teilen (MARTINEC, 1982):

- a) Berechnung der Schneeschmelze
- b) Umsetzung von Regen und Schneeschmelze in Abflusswerte

Im einfachsten Fall beschränken sich Schneeschmelz-Abflussmodelle auf die Lufttemperatur als Indexgrösse für die verfügbare Schmelzwärme. Die Schmelzgrösse wird dabei in Beziehung zur Summe der positiven Temperatur-Tagesmittel gesetzt (Grad-Tag-Methode). Dieses Konzept ist die Grundlage der meisten praktisch verwendeten Schmelzmodelle, da die Lufttemperatur die am besten verfügbare und auch relativ gut räumlich extrapolierbare Messgrösse ist.

In diesem Zusammenhang existieren zwei unterschiedliche Typen von Abflussmodellen, nämlich Kalibrierungsmodelle und deterministische Modelle (MARTINEC 1984; MARTINEC & RANGO, 1985).

4.1. Kalibrierungsmodelle

Momentan benutzen die meisten Schneeschmelz-Abflussmodelle Kalibrierungs- oder Optimierungstechniken um die Modellparameter zu bestimmen. Aufgrund historischer Daten werden die Parameterwerte kalibriert, um eine möglichst gute Übereinstimmung zwischen berechnetem und gemessenem Abfluss zu erhalten. Ist z.B. der simulierte Abfluss, verglichen mit dem gemessenen, zu tief ausgefallen, dann kann der Abflusskoeffizient vergrössert werden; ist der simulierte Abfluss hingegen zu hoch, so kann ein anderer Temperaturgradient die Anzahl Grad-Tage reduzieren.

Bei Kalibrierungsmodellen ist besonders die Art der Schneeflächenbestimmungen hervorzuheben: Schneeakkumulation und -ablation müssen simuliert werden. Die Schneedecke wird dabei durch die Anzahl völlig schneebedeckter bzw. aperer Höhenzonen bestimmt. In einem Gebiet, unterteilt in drei Höhenzonen, würde die Schneedecke folgendermassen abnehmen: 100% (alle 3 Höhenzonen schneebedeckt), 66% (2 Höhenzonen schneebedeckt), 33% (1 Höhenzone schneebedeckt), 0% (aper). Eine solche Aussage wäre aber viel zu global, da die

Schneedecke in stark zertalten Gebieten nicht gleichmässig mit der Höhe abnimmt. Die Ausaperung beginnt nicht nur in einem einzigen Höhenbereich, sondern an vielen Stellen fast gleichzeitig. Auch wenn in diesem Beispiel eine Unterteilung in weitere Zonen vorgenommen würde, wären grössere Ungenauigkeiten in der Schneevertelung nicht zu verhindern. Durch Optimieren des Abflusskoeffizienten, des Temperaturgradienten oder einer Kombination anderer Parameter können die Resultate der Schneeflächensimulation verbessert werden.

In Jahren mit Bedingungen, die etwa den zur Zeit der Kalibrierung herrschenden entsprechen, schneiden diese Modelle gut ab. In Jahren mit veränderten Abflussverhältnissen kommen derartige Modelle aber weniger zurecht als Modelle, die auf physikalischen, vorher bestimmten Parametern beruhen. Zudem weisen verschiedene Kalibrierungsmodelle unterschiedliche Parameterwerte auf, die für jedes neue Einzugsgebiet zuerst frisch kalibriert werden müssen.

4.2. Deterministische Modelle

Die Variablen (Lufttemperatur, Niederschlag und Schneebedeckung) werden gemessen und direkt als Input für Abflussmodelle verwendet. Die Parameter (Rezeptionskoeffizient, Grad-Tag-Faktor usw.) können auf verschiedenen Wegen erhalten werden, sind abhängig von der Philosophie des betreffenden Modells und werden vorherbestimmt (Externally Derived Parameters). Bei deterministischen Modellen – im Gegensatz zu Kalibrierungsmodellen – sollte während den Modellsimulationen kein Aufdatieren der Parameter erfolgen.

Im Unterschied zu Kalibrierungsmodellen wird die Schneefläche und ihre Variationen nicht aus Punktmessungen hergeleitet, sondern wird direkt gemessen. Die Messungen können durch Bodenbeobachtungen, Luftbilder oder Satellitenaufnahmen erfolgen. Aus hydrologischer Sicht bietet gerade das Wissen über die flächenhafte Schneevertelung eine Neuerung, verglichen mit herkömmlichen Punktmessungen. Aus der relativen Schneebedeckung zu verschiedenen Zeitpunkten lassen sich die täglichen Schneebedeckungswerte herleiten, die dann als Input für ein deterministisches Abflussmodell dienen.

Wenn die Schneebedeckung exakt bestimmt werden kann, dann sollten auch die Parameter eines deterministischen Modells möglichst genau erhoben werden. Sie können auf verschiedenen Wegen erhalten werden (MARTINEC & RANGO, 1985; pp. 198):

- a) durch Messungen im Feld (in situ) oder Labormessungen (experimentell)
- b) durch Abschätzung, basierend auf hydrologischen Beurteilungen von Gebietscharakteristika und auf Erfahrungswerten ähnlicher Gebiete
- c) durch physikalische Gesetze oder theoretische Beziehungen (Modellvorstellungen)
- d) durch empirische Regressionsbeziehungen

Die Güte des Modells kann durch Vergleich von simuliertem und gemessenem Abfluss bestimmt werden. Dazu werden die täglichen Werte des natürlichen Abflusses benötigt.

Bei zufriedenstellender Simulationsgüte ist die Methodik auch für Abflussvorhersagen geeignet. Daher wird es nötig, für die genannten Inputvariablen eine geeignete Prognosebasis zur Verfügung zu haben. Abflussvorhersagen können bezüglich ihrer Dauer in Kurz-, Mittel- und Langfristprognosen unterteilt werden (MARTINEC, 1976):

- a) Modelle für kurzfristige Prognosen beruhen auf Tag-zu-Tag (oder auch Stunde-zu-Stunde) Vorhersagen und sind die am weitesten verbreiteten. Die erwarteten Abflusswerte werden jeweils für einen oder mehrere Tage vorhergesagt. Der Abfluss kann prognostiziert werden, wenn tägliche Temperaturwerte frühzeitig abgeschätzt werden können. Die Genauigkeit könnte durch Berücksichtigung anderer Faktoren aus dem Energiehaushalt der Schneedecke (Sonneneinstrahlung, langwelliger Strahlungsaustausch, Windgeschwindigkeit) verbessert werden. Diese Daten sind aber äusserst schwierig zu messen, geschweige denn zu extrapolieren. Solche Kurzfristprognosen können z.B. mit dem "Snowmelt Runoff Model" (MARTINEC et al., 1983; Kapitel 4.3.) durchgeführt werden.

- b) Mittelfristige (saisonale) Prognosen erstrecken sich über mehrere Wochen bis Monate und geben das wahrscheinliche, totale Schneeschmelzvolumen an, das zu einer gewissen Schneeakkumulation (Abb. 7) gehört. Theoretisch wäre es möglich, Kurzfristprognosen auf eine ganze Saison auszudehnen, indem periodisch auftretende Regenfälle zur täglichen Schneeschmelze addiert würden. Saisonale Vorhersagen sollten aber schon zu Beginn der Ausaperungsperiode bekannt gegeben werden. Zu diesem Zeitpunkt sind jedoch der Verlauf der Schneebedeckungskurven – abhängig von der Temperatur und der Schneetiefe – sowie derjenige von Temperatur- und Niederschlagswerten nicht bekannt. Detailliertere Vorhersagen werden deshalb durch Korrelation zwischen Schneereserven und dem daraus resultierenden Abfluss ersetzt.
- c) Langfristprognosen des Abflussvolumens für mehrere Jahre zum voraus basieren mehrheitlich auf statistischen Methoden, da die langjährigen physikalischen Beziehungen, die zu Schwankungen von Schneeakkumulation und -ablation führen, nicht vollständig bekannt sind. Die Akkumulation der saisonalen Schneedecke hängt nicht nur von der gesamten Niederschlagsmenge ab, sondern auch von ihrer saisonalen Verteilung und natürlich auch von den Wintertemperaturen des betreffenden Jahres. Schneegrenzveränderungen und daraus resultierende Abflussänderungen können mit langzeitlichen, klimatischen Trends in Zusammenhang gebracht werden.

Deterministische Modelle können einfach sein und trotzdem (oder gerade deswegen) gute Resultate liefern. Sie können in neuen Einzugsgebieten (sogar in solchen ohne Messungen) eingesetzt werden, ohne neu kalibriert werden zu müssen. Wichtig für gute Simulationsresultate sind jedoch präzise Schneekartierungen.

4.3. SRM – Ein deterministisches Schneeschmelz-Abfluss-Modell

Nur wenige Abflussmodelle sind bis heute dafür vorgesehen, Schneeflächendaten, die z.B. mit Fernerkundungsmitteln bestimmt werden, zu berücksichtigen. Die meisten Modelle werden in ausgewählten Einzugsgebieten mit qualitativ guten, hydrometeorologischen Daten entwickelt und getestet. Gerade in Gebie-

ten, in denen Abflussprognosen einen praktischen Wert haben, sind aber solche Bedingungen selten anzutreffen. Dort lassen sich deshalb auch keine komplizierten Modelle einsetzen, die Daten über Bodenfeuchte, Evaporation, Ein- und Ausstrahlung, sowie Windgeschwindigkeit benötigen. Für operationelle Prognosen muss ein Teil der notwendigen Daten gemessen, ein anderer prognostiziert werden. Einfachere Modelle haben aus diesem Grund grössere Chancen, um vom Simulations- in den Vorhersagemodus überführt werden zu können. Ein Beispiel eines solchen Modells stellt das "Snowmelt Runoff Model" (im folgenden SRM genannt) dar (MARTINEC et al., 1983), das auch unter dem Namen "Martinec Model", oder "Martinec-Rango Model" bekannt ist.

4.3.1. Die Struktur des SRM's

Mit dem SRM kann der vorwiegend aus der Schneeschmelze resultierende Abfluss einer Gebirgsregion auf einer täglichen Basis simuliert oder prognostiziert werden. Die Temperatur, ausgedrückt in Grad-Tagen, wird als Index für den komplexen Energiehaushalt benutzt (Grad-Tag-Methode). Während der Schneeschmelzperiode wird das tägliche Wasservolumen berechnet, das durch Schneeschmelze und Regen anfällt. Diese Wassermengen werden zum Rezessionsfluss addiert und in tägliche Abflusswerte umgerechnet.

Die periodisch für verschiedene Höhenzonen kartierten Schneeflächen (Kapitel 6.) gestatten die Herleitung der Schneebedeckungskurven. Diese Kurven stellen die Variationen der saisonalen Schneedecke während der Ausaperungsperiode dar (Abb. 21 und 22). Aus den Schneebedeckungskurven wird die tägliche relative Schneebedeckung herausgelesen und ins Modell eingesetzt.

Es ist ratsam, das Einzugsgebiet in mehrere Höhenzonen von ungefähr 500m Mächtigkeit zu unterteilen und die Schneebedeckung getrennt für die einzelnen Zonen zu evaluieren, da die Schmelzraten hauptsächlich der Höhe entsprechend variieren (MARTINEC, 1982). Generell kann die Anzahl Zonen kleiner sein als bei Kalibrierungsmodellen, da die effektive und nicht eine hypothetische Schneeverteilung gemessen wird. Bei der Verwendung mehrerer Höhenzonen müssen entsprechend für jede Höhenzone auch die Schneebedeckungskurven hergeleitet werden.

Neben der Schneefläche sind Lufttemperatur und Niederschlag die nächst wichtigen Inputvariablen. Die Parameter wie Rezessionskoeffizient, Abflusskoeffizient, Grad-Tag-Faktor usw., werden im voraus aus aktuellen Daten, Beobachtungen und Gebietskenntnissen abgeleitet oder durch Analogie von einem andern Gebiet abgeschätzt und beziehen sich alle auf diese Höhenzonen.

Die SRM-Formel für eine beliebige Anzahl Höhenzonen lautet (MARTINEC et al., 1983):

$$Q_{n+1} = Q_n k_{n+1} + (1-k_{n+1}) \sum_{i=1}^N A_i \left\{ c_{n,i} \left[\alpha_{n,i} \left(T_n + \Delta T_{n,i} \right) S_{n,i} + P_{n,i} \right] \right\}$$

- wobei
- Q = mittlerer täglicher Abfluss
 - n = Folge von Tagen während der Schneeschmelzperiode. Die Gleichung wurde für eine Zeitverschiebung zwischen dem täglichen Temperaturzyklus und dem daraus resultierenden Abflusszyklus von 18 Stunden geschrieben. Die Anzahl Grad-Tage, gemessen am Tag n, entsprechen dem Abfluss am Tag (n+1)
 - k = Rezessionskoeffizient. Gibt die Abnahme des Abflusses in einer Periode ohne Schneeschmelze und Regen an. Er wird durch die täglichen Abflusswerte bestimmt:

$$k = \frac{Q_{m+1}}{Q_m}$$

(m, m+1 ist die Folge von Tagen während einer Periode mit echtem Rezessionsfluss)

- N = Anzahl Höhenzonen
- A = Fläche pro Zone
- c = Abflusskoeffizient. Er drückt die Abflussverluste eines Gebietes durch das Verhältnis: Abfluss zu Niederschlag aus
- α = Grad-Tag-Faktor. Er gibt die Schneeschmelztiefe an, die aus einem Grad-Tag resultiert
- T = Anzahl Grad-Tage. Basieren auf täglichen Luft-Temperaturwerten
- ΔT = notwendige Anpassung der Temperatur mit einem Temperaturgradienten wegen Unterschieden zwischen der Höhe der Temperaturmessstation und mittlerer hypsometrischer Zonenhöhe
- S = Verhältnis zwischen schneebedeckter Fläche und der Fläche der betreffenden Zone. S basiert auf periodischen Schneeflächenbestimmungen
- P = Niederschlag, der zum Abfluss beiträgt. Ein bestimmter Temperatur-Grenzwert (T_{krit}) entscheidet, ob dieser Beitrag als Regen oder als Schnee zu werten ist.

4.3.2. Die weltweite Verwendung des Modells

Die Entwicklung des Modells hat begonnen mit Studien im Einzugsgebiet Modry Dul (CSSR) mit einer Fläche von 2.65 km^2 (MARTINEC, 1965). Ohne Veränderungen am Modell vorzunehmen, konnte eine Simulation in den Pyrenäen durchgeführt werden. Das Modell wurde in mehreren Schritten neu strukturiert, um für grössere alpine Einzugsgebiete verwendet werden zu können (MARTINEC, 1975 und 1982). Im Dischma bei Davos (43.3 km^2) folgten dazu weitere Simulationsstudien. Die grossen Höhenunterschiede in diesem Gebiet (1680–3146m ü.M.) erforderten die Einführung von Höhenstufen und damit eine getrennte Bestimmung der graduell abnehmenden Schneedecke für diese Zonen.

KELLER (1981) zeigte, wie die Schneebedeckung in ausgewählten Höhenzonen mittels digitalen Satellitendaten bestimmt werden kann, die dann als Input ins Abflussmodell dient.

Bis heute wurde das "Snowmelt Runoff Model" auch in verschiedenen Gebieten Nord- und Süd-Amerikas, Asiens und Europas (Tab. 2) erfolgreich getestet. Trotz starker Vergrösserung der Einzugsgebietsfläche musste keine Abnahme der Simulationsgüte verzeichnet werden.

Die einfache Modellstruktur erwies sich in einem von der World Meteorologic Organisation (WMO) initiierten, internationalen Vergleich von 11 verschiedenen Abflussmodellen als vorteilhaft (RANGO, 1985d; WMO, 1982 und 1986). Die Modelle wurden in sechs unterschiedlichen Einzugsgebieten getestet. Neun der elf Modelle verwendeten den Grad-Tag-Ansatz für die Berechnung des Abflusses aus der Schneeschmelze. Die Schneebedeckungsdaten wurden einzig beim SRM aufgrund von Satellitenbilddauswertungen erhoben.

Der WMO-Test verlangte eine Simulierung sowohl über ein ganzes Jahr als auch über die eigentliche Schneeschmelzperiode. Obwohl das SRM ursprünglich nur für Simulationen während der Schmelzperiode konzipiert war, wurden auch über die längere Periode gute Resultate erzielt.

Die Abschätzung der Simulationsgüte basierte auf einem Vergleich des simulierten und gemessenen täglichen Abflusses. Das sich ergebende Güte-Kriterium (R^2) nach Nash-Sutcliffe (Kapitel 4.3.4.) betrug für das SRM 0.85 bei

Land	Einzugsgebiet	Grösse [km ²]	Höhenunter- schiede [m ü.M.]	Anzahl Jahre	Anzahl Zonen	R ²	ΔQ (%)
BRD	Lange Bramke	0.76	540-700	1	1	-	-
BRD	Wintertal	0.77	560-754	1	1	-	-
CSSR	Modry Dul	2.65	1000-1554	2	1	0.96	1.7
Spanien	Lago Mar	4.5	2234-3004	1	1	-	-
USA	W-3	8.42	346-695	10	1	0.81	8.8
BRD	Lainbachtal	18.7	670-1800	5	1	-	-
CH	Rhone-Gletsch	38.9	1755-3630	1	4	-	-
CH	Dischma	43.3	1668-3146	10	3	0.86	2.5
UK	Feshie	106.0	350-1265	2	1	0.88	-
CH	Landwasser- Frauenkirch	183.0	1500-3146	1	3	-	-
USA	Dinwoody Creek	228.0	1981-4202	2	4	0.85	2.8
Indien	Beas (Manali)	345.0	1900-6600	4	-	0.68	12.0
Japan	Okutadami	422.0	782-2346	3	3	0.83	5.4
USA	Bull Lake Creek	484.0	1790-4185	1	4	0.82	4.8
USA	South Fork	559.0	2506-3914	7	3	0.89	1.8
Polen	Dunajec	700.0	577-2301	1	3	0.73	3.8
USA	Conejos	730.0	2521-4017	7	3	0.87	1.1
Argen- tinien	Lago Alumin	911.0	1145-2496	-	-	-	-
USA	Boise	2150.0	983-3124	1	3	0.85	7.8
Frankreich	Durance	2170.0	786-4105	5	5	0.85	2.6
USA	Cache la Poudre	2732.0	1596-4133	1	3	-	-
CH	Rhein-Felsberg	3249.0	562-3425	2	5	0.80	1.2
USA	Rio Grande	419.0	2432-4215	7	3	0.86	4.7
USA	Kings River	4000.0	171-4341	4	7	0.79	4.4

(nach MARTINEC & RANGO, 1985)

Tab. 2 : Beispiele für Abflussimulationen mit dem "Snowmelt Runoff Model"

der Simulationen während der Kalibrierungsphase, gemessen über alle Simulationsperioden. Die totale volumenmässige Differenz ΔQ betrug 5%. Dieselben Werte lauteten für die Verifikationphase: $R^2 = 0.80$ und $\Delta Q = 7\%$ (Rango, 1985d).

4.3.3. Modellinput

In den nächsten beiden Kapiteln werden die Eingabegrössen für das SRM besprochen. Abb. 12 zeigt schematisch die für das Modell notwendigen Inputdaten und deren Bedeutung. Eine vollständige Zusammenstellung der in dieser Untersuchung verwendeten Inputdaten und Modelloptionen wird im Anhang II gegeben.

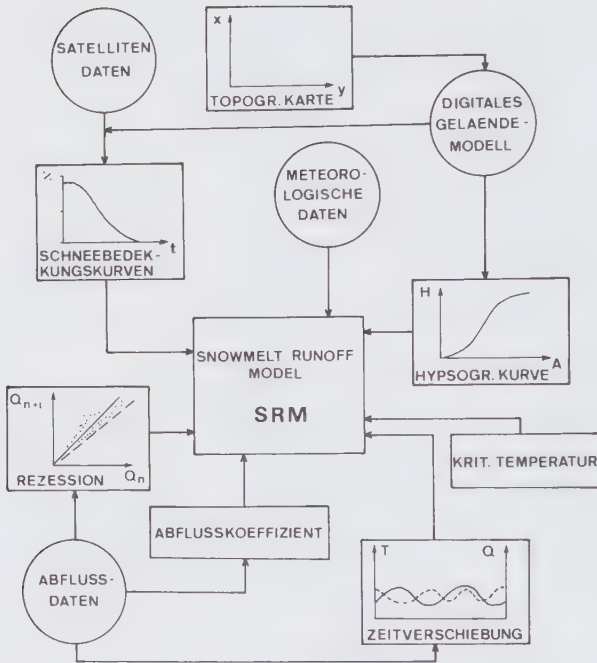


Abb. 12: "Snowmelt Runoff Model": Schema der Eingabegrößen

(nach ENGMAN et al., 1986)

4.3.3.1. Modellvariablen

Die Schneebedeckung (S) stellt eine wichtige Inputvariable dar. Aus der periodisch kartierten Schneedecke werden Schneebedeckungskurven hergeleitet, aus denen dann die täglichen relativen Schneebedeckungswerte ermittelt werden.

Die Schneebedeckungskurven werden erhalten, indem die relativen Schneebedeck-

kungen (in %) aus mehreren Satellitenbildern in Funktion der Zeit aufgetragen werden. Da eine Unterteilung in Höhenzonen vorgenommen wird, müssen die täglichen Schneebedeckungswerte für jede Zone getrennt eingegeben werden.

Temperatur: Wenn möglich sollte die Temperatur innerhalb des Einzugsgebietes auf mittlerer Gebiets- oder Zonenhöhe von mehreren Stationen gemessen werden. Im Normalfall sind die Messstationen aber nicht auf mittlerer Zonenhöhe lokalisiert. Aus diesem Grund müssen die Temperaturwerte von Stationshöhe auf mittlere hypsometrische Zonen- oder Gebietshöhe extrapoliert werden. Die Extrapolation erfolgt unter Verwendung eines Temperatur-Korrekturwertes (Temperature Lapse Rate Correction Factor):

$$\Delta T = \delta (\bar{h} - h_{St})$$

wobei

ΔT	= Temperatur-Korrekturwert (in °C)
δ	= Temperaturgradient (in °C pro 100m; Kapitel 4.3.2.)
h_{St}	= Höhe der Station (in m ü.M.)
$\bar{h}$	= Mittlere hypsometrische Zonenhöhe

Dieser Wert sollte möglichst sorgfältig bestimmt werden, da die Extrapolation und schliesslich die Schmelzwasserproduktion sehr empfindlich darauf reagieren. Es muss beachtet werden, dass vorläufig nur eine Station ins Modell eingegeben werden kann.

Auch die Niederschläge sollten an mehreren Stellen innerhalb des Einzugsgebietes gemessen werden. Eine kritische Temperatur (Kapitel 4.3.2.), erfahrungsgemäss immer etwas über 0°C, entscheidet, ob ein Niederschlag als Schnee oder Regen fällt. Regen trägt noch am selben Tag zum Abfluss bei, während die im frisch gefallenen Schnee enthaltene Wassermenge zurückgehalten wird.

4.3.3.2. Modellparameter

Die Parameterwerte werden, entsprechend dem deterministischen Ansatz des Modells, im voraus bestimmt (MARTINEC & RANGO, 1986):

Der Abflusskoeffizient (c) gibt das Verhältnis zwischen dem aus Schneeschmelze und Regen zur Verfügung stehenden Wasser und dem Abfluss an. Dieser

gebietsabhängige, zonal und jährlich variierende Koeffizient zeigt die Wasserverluste eines Einzugsgebietes auf. Während der Ausaperungsperiode sind diese Verluste gering und beschränken sich auf die Evaporation von der Schneeoberfläche, nehmen aber bedingt durch Evapotranspiration und Interception (Anteil des Niederschlags, der durch die Pflanzendecke zurückgehalten wird, d.h. der nie die Erdoberfläche erreicht) gegen Ende der Periode zu. Für Schneeschmelze und Regenfälle werden unterschiedliche Koeffizienten verwendet, da die Verluste für Regen grösser sind als für Schnee. Ueber längere Perioden (ein Jahr und mehr) sollten sich diese Verluste aufheben, so dass der Koeffizient dem Verhältnis von jährlichem Abfluss zu jährlichem Niederschlag entspricht.

Der Grad-Tag-Faktor (α) ist ein Index für den Energiehaushalt (Kapitel 3.1.2.2.). Er konvertiert die Anzahl Grad-Tage ($T > 0^\circ\text{C}$) in Schneeschmelztiefe. Die Werte dieses Faktors variieren während der Ausaperungszeit, da die wechselnden physikalischen Eigenschaften von Schnee den Schmelzprozess beeinflussen. Da keine detaillierten Daten existieren, hat MARTINEC (1960) folgende empirische Beziehung aufgestellt:

$$\alpha = 1.1 \frac{\varphi_S}{\varphi_W}$$

wobei

α	= Grad-Tag-Faktor
φ_S	= Dichte von Schnee
φ_W	= Dichte von Wasser

Der Grad-Tag-Faktor nimmt parallel mit der Zunahme der Schneedichte im Verlaufe der Schmelzperiode zu, weshalb φ_S ein guter Index für die Zunahme von α ist.

Der Rezessionskoeffizient (k) gibt die Abnahme des Abflusses in einer Periode ohne Schneeschmelze und Niederschlag an. Das SRM reagiert sehr empfindlich auf diesen Koeffizienten, da $(1-k)$ den Anteil der täglichen Schmelzwasserproduktion darstellt, der sofort im Abfluss erscheint. Eine sorgfältige Bestimmung von k ist deshalb zu empfehlen. Aufgrund historischer Abflussdaten ist eine Reihe von Wertepaaren Q_n und k_{n+1} bekannt. Daraus lassen sich mittels Regressionsanalyse die beiden Gleichungsparameter x und y bestimmen:

$$k_{n+1} = x Q_n^{-y}$$

wobei

k	=	Rezessionskoeffizient
Q	=	Täglicher Abfluss
n	=	Folge von Tagen
x, y	=	Zu bestimmende Gleichungsparameter

Eine genaue Beschreibung zur Bestimmung der Konstanten bzw. des Rezessionskoeffizienten wird bei MARTINEC et al. (1983) angegeben.

Schwierigkeiten in der Bestimmung von k treten auf, wenn die gemessenen Abflussdaten nicht dem natürlichen Abfluss entsprechen. In diesem Fall muss der Koeffizient aufgrund bekannter Werte eines andern Einzugsgebietes abgeleitet werden:

$$k_{N,n} = \left\{ x_M \left[\frac{\bar{Q}_M}{\bar{Q}_N} Q_{N,n-1} \right]^{-y_M} \right\} \sqrt{A_M / A_N}$$

wobei

k_N	=	Rezessionskoeffizient
x_M, y_M	=	Konstanten des bekannten Einzugsgebiet M
Q_M, Q_N	=	Abflusswerte von Einzugsgebiet M und dem neuen Gebiet N ($Q_N \geq 0$)
A_M, A_N	=	Flächen der betreffenden Gebiete
n	=	Folge von Tagen

Die Zeitverschiebung (L): Durch den täglichen Temperaturanstieg und die dadurch ausgelöste Schneeschmelze wird der Abfluss initialisiert. Der Abflusszyklus findet aber gegenüber den Tages-Temperaturverlauf verzögert statt. Aus der Verschiebung der beiden Zyklen kann die Zeitverschiebung bestimmt werden.

Der Abfluss am Tag n ist zusammengesetzt aus einem Anteil des Abflusses von Tag n und einem Anteil von Tag (n-1), in komplizierten Fällen sogar von meh-

reren vorhergehenden Tagen. In grossen Einzugsgebieten mit mehreren Höhenzonen verändert sich die Zeitverschiebung während der Ausaperungsperiode, da sich die räumliche Verteilung der Schneedecke verändert. Wenn der Abfluss nicht dem natürlichen entspricht, muss dieser Wert durch Vergleich mit anderen Einzugsgebieten bestimmt werden.

Die kritische Temperatur (T_{krit}) ist verantwortlich für die Entscheidung, ob der Niederschlag in Form von Regen oder von Schnee fällt.

Wenn der Niederschlag als Schnee fällt, hängt es davon ab, ob er auf schneebedeckte oder auf apere Flächen fällt. Fällt der Schnee auf bereits schneebedeckte Flächen, dann trägt er zur Akkumulation der saisonalen Schneedecke bei, andernfalls wird der Schnee während der Ausaperungsphase nur bis zum nächsten warmen Tag mit genügend Grad-Tagen gespeichert.

Wenn der Niederschlag in Form von Regen fällt, hängt es davon ab, ob er auf schneefreie oder auf schneebedeckte Flächen fällt. Im ersten Fall trägt der Regen zum sofortigen Abfluss bei, im zweiten Fall wird er durch die Schneedecke zurückgehalten. Erst wenn die Schneedecke einen gewissen Metamorphosegrad erreicht hat, wird der Regen durchgelassen und trägt dann direkt zum Abfluss bei.

Der Temperaturgradient (δ) wird benötigt, um den Temperatur-Korrekturwert (Kapitel 4.3.3.1.) berechnen zu können. In alpinen Gebieten beträgt δ ungefähr -0.65°C pro 100m. Das SRM reagiert sehr empfindlich auf eine Veränderung von δ . Bei einer Höhendifferenz von 2000m zeigt ein Fehler von $0.05^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ eine Abweichung von 1.0 Grad-Tagen, was einen Fehler von 0.5cm Schneeschmelztiefe zur Folge hat (MARTINEC & RANGO, 1985). Beim Einsatz des Modells in anderen, nicht-alpinen Gebieten muss auf diesen Wert besonders geachtet werden.

4.3.4. Handhabung des Modells und Genauigkeitsabschätzung

Simulationen können mit dem SRM über eine Ausaperungsperiode durchgeführt werden, bei Bedarf auch über ein Jahr oder länger. Bei Simulationen ausserhalb der Schneeschmelzperiode muss besonders auf den Abflusskoeffizienten

geachtet werden. Dieser Wert beinhaltet die Effekte von Evapotranspiration und Bodenfeuchte. Sie sind während der Schneeschmelze klein, nehmen aber gegen Ende der Ausaperungsperiode hin zu und müssen deshalb bei längeren Simulationsperioden berücksichtigt werden.

Tägliche Abflussmesswerte sind nicht Vorbedingung für Simulationen oder Prognosen mit dem SRM, finden jedoch verschiedentlich Anwendung:

- zur Bestimmung des Rezessionskoeffizienten
- bei der Bestimmung der Zeitverschiebung zwischen Temperatur- und Abflusszyklus
- für die Bestimmung der Simulationsgüte

Ganz deutlich muss darauf hingewiesen werden, dass während einer Abflussimulation kein Aufdatieren, d.h. kein Optimieren der Parameter notwendig ist.

Die Simulationsgüte kann durch den Vergleich von simuliertem und gemessenem Abfluss bestimmt werden. Die prozentuale Differenz zwischen den beiden Abflussvolumen wird wie folgt berechnet:

$$D_V = \frac{Q_C - Q_M}{Q_M}$$

wobei D_V = Relative Volumendifferenz
 Q_M, Q_C = Gemessener (M) und simulierter (C) Abfluss

Die auf einer täglichen Basis bestimmte Modellgüte wird mit dem ebenfalls dimensionslosen Nash-Sutcliffe R²-Wert ("Goodness-of-Fit Measure") angegeben (NASH & SUTCLIFFE, 1970):

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N \{ Q_{M,i} - Q_{C,i} \}^2}{\sum_{i=1}^N \{ Q_{M,i} - \bar{Q} \}^2}$$

wobei	R^2	= Mass für die Modelleffizienz
	$Q_{M,i}$	= Gemessener Abfluss am Tag i
	$Q_{C,i}$	= Simulierter täglicher Abfluss
	$\bar{Q}$	= Mittlerer beobachteter Abfluss
	N	= Anzahl Tage

Das Modell liefert unter Einbezug der gemessenen Abflusswerte folgende vier Outputangaben:

- a) Simulierte tägliche Abflussmengen
- b) Saisonales Abflussvolumen (Summe der täglichen simulierten Werte)
- d) Gütemass (R^2)
- c) Volumenmässige Differenz zwischen simuliertem und gemessenem Abfluss

Die Berechnungen derartiger Simulationen wird in Kapitel 7. anhand der Beispiele aufgezeigt.

5. DAS EINZUGSGEBIET RHEIN-FELSBERG

5.1. Auswahlkriterien

Um den Abfluss in einem alpinen Gebiet zu simulieren, wurde ein Testgebiet ausgewählt, das verschiedenen Anforderungen genügen muss:

Das Gebiet soll deutlich grösser sein als die bisher für Abflusssimulationen verwendeten (z.B. grösser als das Dischma mit ca. 43km²). Andererseits muss die bei den digital auszuwertenden Satellitenbildern anfallende Datenmenge noch mit einem vernünftigen Aufwand zu bewältigen sein.

Innerhalb oder doch zumindest in nächster Nähe des Testgebietes müssen meteorologische Stationen vorhanden sein, deren Angaben (Temperatur und Niederschlag) als Modellinput für Abflusssimulationen eingesetzt werden können.

Für die Bestimmungen der Simulationsgüte wird eine Abflussmessstelle benötigt, wodurch sich eine gewisse Einschränkung bei der Auswahl des Einzugsgebietes ergibt.

In der Schweiz existiert das gut ausgebaute Klimamessnetz der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt und das Pegel- und Abflussmessnetz der Landeshydrologie, so dass die Datenbeschaffung für nahezu alle Gebiete problemlos erfolgen kann.

Im Vorderrheintal (LICHTENEGGER et al., 1981) und im Raum Davos (KELLER, 1987) wurden bereits mehrere Arbeiten zur digitalen Schneeflächenbestimmungen durchgeführt. Um die vorhandenen Erfahrungen und Kenntnisse einbeziehen zu können, wird ein Gebiet in unmittelbarer Nähe festgelegt.

Die Wahl fiel auf das Gebiet "Rhein-Felsberg" (Kanton Graubünden), d.h. das gesamte Einzugsgebiet oberhalb der Abflussmessstelle Felsberg bei Chur.

Für dieses Gebiet sind von den Ausaperungsperioden 1982 und 1985 genügend Fernerkundungsdaten vorhanden, um die Ausaperung dieses Gebietes kartieren zu können. Bei den folgenden Schneeflächenbestimmungen und Abflussimulationen beschränken wir uns auf die Verwendung dieser beiden Jahre.

Zur Geokodierung der in Frage kommenden Satellitenbilder wird (in Anlehnung an das Kilometerkoordinatennetz der Schweizerischen Landeskarte) ein Raster geeigneter Maschenweite festgelegt (100m für Landsat-MSS und 500m für NOAA/AVHRR).

5.2. Kurze geographische Charakterisierung

Das Einzugsgebiet Rhein-Felsberg (Abb. 13) weist eine Fläche von 3249km² und eine Höhendifferenz von 3043m (571-3614m ü.M.) auf. Der höchste Punkt ist der Tödi mit 3614m ü.M., der tiefste ist die Abflussmessstelle Felsberg auf 571m ü.M..

Die mittlere Höhe des Gebietes liegt bei etwa 2050m ü.M. (Abb. 16). Nur etwa 15% des Gebietes liegen unterhalb von 1400m ü.M., 5% über 2500m ü.M.; rund 50% der Region befinden sich zwischen 1600 und 2400m ü.M.. Die Vergletscherung ist in diesem Gebiet mit 3% verhältnismässig gering.

Der Abfluss resultiert von fünf grösseren Flüssen, nämlich: Vorderrhein, Hinterrhein, Landwasser, Albula und Julia. Die einzelnen Flüsse sind wiederum aufgeteilt in viele kleine Seitenflüsse und -bäche. Das Flussnetz widerspiegelt deutlich die komplexen topographischen Verhältnisse.

5.3. Klima

Das Einzugsgebiet Rhein-Felsberg kann in drei klimatisch unterschiedliche Teilgebiete gegliedert werden: Der westliche Teil (Vorderrhein) weist eine signifikant höhere Niederschlagsmenge auf als der östliche (Landwasser, Albula, Julia). Die Region Disentis z.B. weist 120-200mm Niederschlag mit 120-160 Niederschlagstagen pro Jahr auf. Das Gebiet um Alvaneu hingegen erhält in der gleichen Zeit weniger als 100mm Niederschlag an 100-120 Niederschlagstagen. Der südliche Teil (Hinterrhein) wird bereits durch das Klima der Alpensüdseite beeinflusst, d.h. es treten ergiebige Stauniederschläge innerhalb kurzer Zeit auf, vor allem im Sommer und im Herbst.



Abb. 13: Lage des Testgebietes "Rhein-Felsberg", der meteorologischen Stationen (●) und der Abflussmessstelle (→). Ausschnitt aus der Landeskarte 1:500'000 (reproduziert mit Bewilligung des Bundesamtes für Landestopographie vom 23.4.87).

5.4. Meteorologische Stationen

Die unterschiedlichen klimatischen Bedingungen im Gebiet Rhein-Felsberg sind durch die topographischen Verhältnisse zu begründen. Diesen klimatischen Variationen kann Rechnung getragen werden, da verteilt über das ganze Gebiet mehrere meteorologische Stationen existieren. Für unsere Untersuchungen von Interesse sind vor allem die Daten des automatischen Messnetzes (ANETZ), das von der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt betreut wird (MUELLER, 1985). Die Daten werden alle 10 Minuten erfasst und via Telefonleitung an die SMA übermittelt.

Da momentan die Daten von nur einer Station ins Modell eingegeben werden können und trotzdem für alle Höhenstufen repräsentative Temperatur- und Niederschlagsdaten benötigt werden, müssen aus den Werten von sieben Stationen (SMA, 1982 und 1985) synthetische Stationen (SYN82 bzw. SYN82T und SYN85) berechnet werden (Tab. 3).

Tab. 3 : Verwendete meteorologische Stationen

Alvaneu	1175m ü.M.
Arosa	1847m ü.M.
Chur	586m ü.M.
Davos	1590m ü.M.
Disentis	1180m ü.M.
Hinterrhein	1619m ü.M.
Weissfluhjoch	2667m ü.M.

Die Temperatur- (T) und Niederschlagswerte (P) für diese synthetischen Stationen werden in folgender Weise berechnet:

$$T = \frac{1}{6} \left\{ T_{\text{Alvaneu}} + T_{\text{Arosa}} + T_{\text{Chur}} + T_{\text{Disentis}} + T_{\text{Hinterrhein}} + T_{\text{W'joch}} \right\}$$

$$P = \frac{1}{6} \left\{ P_{\text{Alvaneu}} + P_{\text{Chur}} + P_{\text{Davos}} + P_{\text{Disentis}} + P_{\text{Hinterrhein}} + P_{\text{W'joch}} \right\}$$

Für die Temperaturberechnungen wird anstelle der Station Davos diejenige von Arosa verwendet, da letztere, obwohl ausserhalb des Testgebietes liegend,

repräsentativere Temperaturdaten (geringere Lokaleinflüsse) liefert. Auch die Station Chur liegt ausserhalb des Gebietes, doch kann auf sie nicht verzichtet werden, da auch für die unterste Höhenstufe eine repräsentative meteorologische Station benötigt wird. Die mittlere Höhe der synthetischen Stationen SYN82 und SYN85 beträgt $\bar{h} = 1523\text{m ü.M.}$. Um den Einfluss der regional-klimatischen Unterschiede auf die Abflussimulationen bestimmen zu können, werden in Kapitel 7.3. Simulationen für die Teilgebiete durchgeführt. Für jedes Teilgebiet werden separate meteorologische Daten eingesetzt.

5.5. Abflussregime

Die Abflussganglinie des Einzugsgebietes Rhein-Felsberg entspricht nicht der natürlichen, da praktisch alle Flüsse durch Wasserkraftwerke manipuliert werden. Gleichwohl gelingt eine Typisierung des Abflussregimes, wie es in ASCHWANDEN & WEINGARTNER (1983) vorgeschlagen wird: Das Einzugsgebiet Rhein-Felsberg wird dem nivo-glazialen Regime zugeordnet. Die Typisierung erfolgt aufgrund der Rangfolge der das Regime prägenden Monate:

Juni>Juli>Mai-August

Am Hinterrhein lassen sich die natürlichen Verhältnisse noch am besten erkennen: Der Winterabfluss (Oktober bis März) mit einem Minimum im Februar beträgt lediglich 12% des jährlichen Abflusses. Im März beginnt der Abfluss infolge der Schneeschmelze anzusteigen (April-Juni: 37%) und dauert bis in den Juli und August (Juli-September: 51%). Die täglichen Spitzenwerte werden durch Sommerniederschläge noch verstärkt. Die tiefen Abflusswerte während der Uebergangszeit (Oktober, November) und im Winter (Dezember-März) sind typisch für alpine Abflussregimes (LAUFER, 1977).

5.6. Manipulation des Abflusses

Für eine Gütebestimmung des simulierten Abflusses sowie für die Bestimmung des Rezessionskoeffizienten und der Zeitverschiebung zwischen Temperatur- und Abflusszyklus werden die natürlichen Abflussdaten der Station Felsberg benötigt.

Die Bestimmung dieser Werte ist indessen nicht so einfach möglich, da oberhalb von Felsberg mehrere Stauseen gelegen sind und der Abfluss wegen der Manipulation dieser Seen durch die Wasserkraftwerke erheblich beeinflusst wird. Die Abflussganglinie zeigt tägliche, wöchentliche und saisonale Schwankungen, die alle von den natürlichen Variationen abweichen. Ganz deutlich sind die täglichen und wöchentlichen Schwankungen auszumachen (Abb. 14): Während fünf Arbeitstagen ist täglich ein Minimum (zwischen 3 und 5 Uhr) und ein Maximum (ca. 12 Uhr) festzustellen. An Wochenenden bleibt der Abfluss auf Minimalwerten. Daraus kann gefolgert werden, dass die Abflusswerte sich nach den Zeiten maximalen bzw. minimalen Stromverbrauchs richten.

Eine Rekonstruktion des natürlichen Abflusses ist nur möglich, wenn die Elektrizitätsgesellschaften Angaben über die täglichen Zu- und Abflussmengen von Stauseen machen können. Entsprechende Angaben der Nordostschweizerischen Kraftwerke (NOK) und der Elektrizitätswerke der Stadt Zürich (EWZ) ermöglichen eine Rekonstruktion des natürlichen Abflusses im Gebiet Rhein-Felsberg. Dabei müssen die täglichen Manipulationswerte aller grösseren Speicherseen berücksichtigt werden. Folgende Kraftwerke werden bei der Rekonstruktion des natürlichen Abflusses berücksichtigt:

- | | | |
|--------------------------------|---|-----|
| - Kraftwerke Vorderrhein (KVR) | } | NOK |
| - Kraftwerke Zervreila (KWZ) | | |
| - Kraftwerke Hinterrhein (KHR) | } | EWZ |
| - Kraftwerke Mittelbünden | | |

Die dazugehörigen Speicherseen und einige wichtige Angaben sind in Tab. 4 zusammengefasst.

Tab. 4 : Seefläche und Nutzinhalt der zur Korrektur verwendeten Speicherseen

Speichersee	Seefläche	Nutzinhalt	Werk
Lago di Lei	4.12km ²	197Mio m ³	KHR
Lai da Sta. Maria	1.77km ²	67Mio m ³	KVR
Zervreilasee	1.61km ²	100Mio m ³	KWZ
Lai da Marmorera	1.41km ²	60Mio m ³	EWZ
Lai da Nalps	0.91km ²	45Mio m ³	KVR
Sufnersee	0.90km ²	18Mio m ³	KHR
Lai da Curnera	0.81km ²	42Mio m ³	KVR

Für die Rückrechnung auf den natürlichen Abfluss werden alle Tageswerte der natürlichen Zuflüsse in die Stauseen sowie die Produktionsmengen bzw. Ueberleitungen (ungenutzt abfliessendes Wasser) benötigt. Berücksichtigt werden müssen auch die während der Nacht zurückgepumpten Wassermengen (Pumpspeicherwerke wie z.B. von den KHR), da dieses Wasser nicht sofort zum Abfluss beiträgt. Falls der natürliche Zufluss in die Stauseen grösser als die Produktionsmenge war (Speicherung), dann werden die täglichen Differenzen zum gemessenen Abfluss addiert. Im umgekehrten Fall (Ableitung > Zufluss) werden sie vom gemessenen Abfluss subtrahiert. Zwei Extremwert-Beispiele zur Rekonstruktion des natürlichen Abflusses zeigen deutlich, wie gross der Einfluss der Wasserkraftwerke auf den Abfluss sein kann und wie unmöglich ein Vergleich mit den simulierten Daten wäre, wenn keine Korrekturangaben erhältlich wären.

Am 7. Juni 1985 wurde ein Abfluss von $32'918 \times 10^3 \text{ m}^3$ gemessen. Der Korrekturwert beträgt $+16'638 \times 10^3 \text{ m}^3$, d.h. es wurde in diesem Ausmass Wasser gespeichert. Unter natürlichen Verhältnissen wäre somit 50% mehr Wasser abgeflossen.

Am 14. April 1982 konnte ein gemessener Abfluss von $10'714 \times 10^3 \text{ m}^3$ ausgezeichnet werden. Unter natürlichen Bedingungen wäre der Abfluss um 47% geringer ausgefallen. Es wurden demnach $5'027 \times 10^3 \text{ m}^3$ Wasser aus den Stauseen entnommen.

Abb. 15 zeigt den Vergleich zwischen gemessenem und rekonstruiertem (natürlichen) Abfluss der Station Felsberg recht deutlich: Praktisch alle grösseren täglichen, wöchentlichen und saisonalen Schwankungen können eliminiert werden (z.B. April, Mai). Ersichtlich ist auch, dass im Frühjahr mehr Wasser, im Sommer hingegen weniger abfließt als unter natürlichen Bedingungen.

5.7. Schneeverhältnisse 1981/1982 und 1984/1985

Die folgenden Ausführungen geben einen kleinen Einblick in die meteorologischen Bedingungen und den Zustand der Schneedecke für die beiden hydrologischen Jahre 1981/1982 und 1984/1985 und sollen die Diskussion der in Kapitel

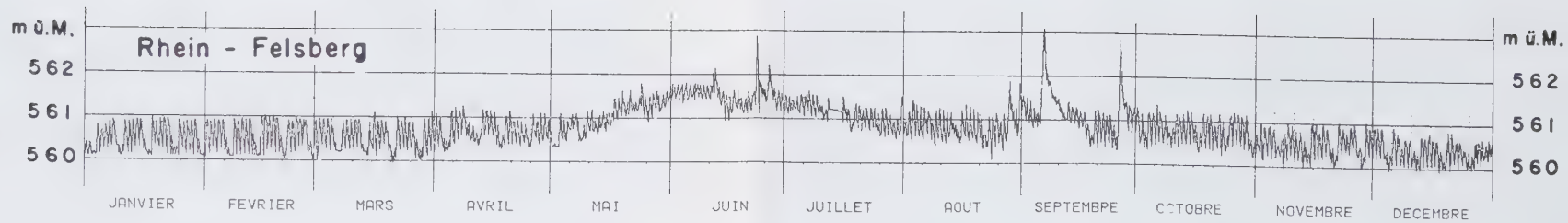


Abb. 14: Verlauf des Wasserstandes (Pegel) bei Felsberg, 1982

(aus: HYDROLOGISCHES JAHRBUCH, 1982)

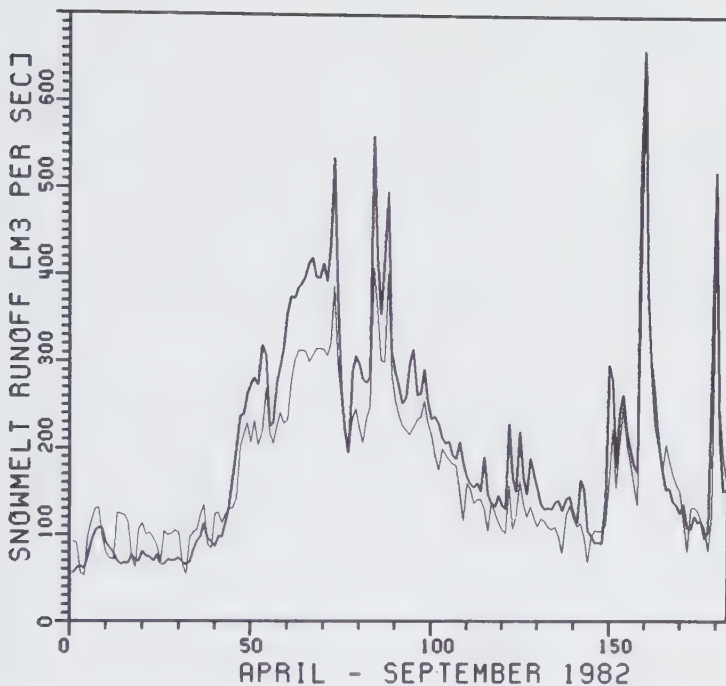


Abb. 15: Vergleich der gemessenen Abflussganglinie (mager) mit der Rekonstruktion des natürlichen Abflusses (fett)

7. durchgeführten Abflusssimulationen erleichtern.²

Winter 1981/1982: Der Winter 1981/1982 kann als sehr schneereich betrachtet werden: Die ersten Oktoberschneefälle führten wohl oberhalb von ca. 2000m zu einer geschlossenen Schneedecke, doch aperten die meisten Hänge dank warmer

2. Die Daten sind den Winterberichten des Eidgenössischen Institutes für Schnee- und Lawinenforschung, Weissfluhjoch-Davos entnommen (WINTERBERICHTE DES EISLF, 1983 und 1986)

Witterung bis auf 2400m wieder aus. Während Berglagen 5-10 Tage früher als üblich ihre bleibende Schneedecke erhielten, geschah dies in den Tallagen am üblichen Datum (10. November). Der Schneezuwachs im November war allgemein eher mässig. Ähnlich wie der Oktober war auch der Dezember sehr niederschlagsreich. Durch zwei warme Perioden mit Regen bis auf 2000m setzte sich der Schnee stark. Die Differenz der Schneehöhen zwischen dem ersten und letzten Dezembertag lässt deshalb kaum auf die grossen Schneemengen schliessen, die in diesem Monat abgelagert wurden. Der Januar brachte bei eher milder und wechselhafter Witterung zwei grössere Schneefallperioden, die zu Maximal-Schneehöhen führten. Die Schneefälle dauerten auch im Februar und März an, so dass Ende März in allen Regionen überdurchschnittliche Schneemengen festgestellt werden konnten. Auf dem Weissfluhjoch wurde am 19. März die maximale Schneehöhe des Winters 1981/1982 gemessen. Am Ende des Monats lag die Schneegrenze am Alpennordhang 150-200m tiefer als im Durchschnitt. In der ersten Dekade des April wurde die Schneedecke dank sonnigem, warmem Frühlingswetter stark umgewandelt und in tieferen Lagen abgebaut. Eine deutliche Abkühlung durch Bisenlage (11. April), die 30 Tage anhielt, verzögerte die Durchfeuchtung der Schneedecke und das Ausapern. In Berglagen setzte die Durchfeuchtung mit einer Verspätung von rund 20 Tagen ein. Ende April waren deshalb immer noch überdurchschnittliche Schneemengen zu verzeichnen. Am 12. Mai begann eine rund einmonatige Wärmeperiode. Die Nullgradgrenze stieg bis auf 4000m, was den Abbau der Schneedecke stark vorantrieb. Trotz der grossen Schneemengen aperten die Tallagen nur mit 5-10 Tage Verspätung aus als im langjährigen Mittel, die Berglagen sogar etwa zur Normzeit.

Winter 1984/1985: Die ersten Schneefälle wurden auf dem Weissfluhjoch bereits am 6. September 1984 gemessen, was seit 50 Jahren den frühesten Wintereinbruch bedeutete. Dieser frühe Schnee schmolz allerdings in den nachfolgenden Wärmeperioden bis auf 2300m ü.M. wieder weg. Oberhalb dieser Höhe bildete er aber die Basis für die winterliche Schneedecke. Erst am 17. November erhielten auch die unteren Lagen eine bleibende Schneedecke. Die dünne Schneedecke wurde in den Monaten Oktober, November und Dezember stark umgewandelt. Im Januar traf die "Kältewelle des Jahrhunderts" ein, die in Berglagen Minimaltemperaturen von -20°C bis -30°C brachte und rund 15 Tage dauerte. Die Schneedecke wies bis in den Februar hinein meist eine geringe bis mässige Mächtigkeit auf. Grössere Schneefälle zu Beginn und Mitte Fe-

bruar und die dann beginnende wechselhafte Witterung führten zu einer Stabilisierung der Oberflächenschichten. Die Schneedecke wurde im März, der wechselhaft und kühl war, bis auf 2000m ü.M. hinauf feucht und verfestigte sich dadurch. Bis Anfang April (8. April) hatte sich die Schneedecke an ihrer Oberfläche durch eine Wärme- und Kältewelle gut verfestigt. Der Mai, der anfänglich kühl und schneereich war, liess die Schneehöhe oberhalb 2000m ü.M. auf überdurchschnittliche Werte ansteigen. Bei warmer und sonniger Witterung wurde die Schneedecke in dieser Höhenlage erst spät, am 15. Mai durchfeuchtet. Der trübe und regnerische Juni hatte eine weitere verzögernde Wirkung auf die Ausaperung. Kaltlufteinbrüche (7. Juni) und späte, intensive Schneefälle bei mittleren Temperaturen und normaler Sonnenscheindauer waren verantwortlich für das zu späte Ausapern besonders in höheren Regionen.

Vergleich der Schneeverhältnisse 1981/1982 und 1984/1985: In Hinsicht auf die Abflusssimulationen weisen die beiden betrachteten Jahre deutliche Unterschiede auf. Es ist zu erwarten, dass sich die zu simulierenden Abflussganglinien der beiden Ausaperungsperioden wegen dieser unterschiedlichen Bedingungen deutlich differenzieren lassen (Kapitel 8.1.).

6. BESTIMMUNG DER SCHNEEFLEACHEN MIT DIGITALEN LANDSAT-MSS- UND NOAA/AVHRR-DATEN

Ziel der folgenden experimentellen Auswertungen ist die präzise Bestimmung der Schneebedeckung mittels Landsat-MSS- und NOAA/ AVHRR-Daten im Verlaufe der zwei Ausaperungsperioden 1982 und 1985. Aufgrund der daraus resultierenden relativen Schneebedeckungswerte werden die Schneebedeckungskurven in ausgewählten Höhenstufen hergeleitet.

Für die quantitative Auswertung von Satellitendaten (SCHOWENGERDT, 1983, SEIDEL et al., 1983) wurden Methoden der digitalen Bildverarbeitung entwickelt (Kapitel 3.3.4.).

In einem ersten Schritt muss aus den zur Verfügung stehenden Fernerkundungsdaten eine geeignete Auswahl getroffen werden (Kapitel 6.1.).

Anschliessend wird die Anwendung des DGM's im Zusammenhang mit der Auswertung von Fernerkundungsdaten besprochen (Kapitel 6.2.). Dann wird das Vorgehen bei den verschiedenen Vorverarbeitungsschritten (Bildrestauration, Geokodierung und Erstellen digitaler Masken) aufgezeigt (Kapitel 6.4.), wobei speziell die unterschiedliche Behandlung von Landsat-MSS- und NOAA/ AVHRR-Daten herausgestellt wird.

Die Schneebedeckung wird mit Hilfe überwachter Klassifikationsverfahren hergeleitet (Kapitel 6.6.). Die ausgewerteten Daten (Schneebedeckungskarten) und Zusatzinformationen (DGM, Einzugsgebiet, Masken) werden zu einem multivariaten Datensatz (Kapitel 6.7.) zusammengestellt, was dank der Geokodierung leicht möglich ist.

Für die wegen Bewölkung nicht klassierbaren Regionen werden zwei Verfahren erprobt, die eine Rekonstruktion der Schneedecke erlauben (Kapitel 6.8.).

Untersuchungen zeigen die Auswirkungen des räumlichen Auflösungsvermögens eines Sensorsystems auf die Klassifikationsgenauigkeit (Kapitel 6.9.2.).

Zuletzt werden aus den Schneeflächenkarten die Schneebedeckungskurven hergeleitet (Kapitel 6.10.), aus denen die täglichen Schneebedeckungswerte herausgelesen werden und schliesslich als Input ins SRM eingehen.

6.1. Auswahl von Fernerkundungsdaten

Bei der Datenauswahl müssen folgende Bedingungen berücksichtigt werden: Die Ausaperungsperiode beginnt Anfang April und dauert bis etwa Ende Juli. Für alle Daten kurz vor oder während des Aufnahmezeitpunktes darf kein Neuschnee gefallen sein, da sonst nicht die echte, sondern eine überdimensionierte, nur kurzlebige Schneedecke kartiert würde. Zweitens sollten während einer Ausaperungsperiode ca. einmal wöchentlich eine MSS- oder AVHRR-Aufnahme zur Verfügung stehen.

Für MSS-Daten gilt zusätzlich die Bedingung, dass die Wolkenbedeckung im Bereich des Testgebietes höchstens 50%-70% betragen sollte, damit eine Rekonstruktion der Schneedecke noch möglich ist.

Bei der Auswahl von AVHRR-Daten muss noch folgende Bedingung berücksichtigt werden: Es sollten Aufnahmen ausgewählt werden, auf denen das Einzugsgebiet möglichst nahe der Nadirlinie zu liegen kommt. Ideal wäre eine Lage zwischen einem Abtastwinkel von $\pm 20^\circ$, maximal jedoch eines solchen von $\pm 40^\circ$ (Kapitel 3.3.2.2.).

Diese Bedingungen bedeuten eine drastische Reduktion der bei der Bodenstation erhältlichen Aufnahmen. Eine Prüfung der historischen Aufnahmen ergab, dass nur gerade zwei Ausaperungsperioden diese Forderungen erfüllen, nämlich die Winter 1981/1982 und 1984/1985 (Tab. 5). Es muss jedoch bemerkt werden, dass für das untersuchte Gebiet erst seit 1984 regelmässig NOAA-Daten aller fünf Kanäle erhältlich sind.

Für die Ausaperungsperiode 1982 stehen zwar fünf Landsat-MSS-, jedoch nur gerade drei NOAA/AVHRR-Bilder zur Verfügung. Im Jahre 1985 sind für Schneeflächenbestimmungen immerhin sechs MSS- und vier AVHRR-Bilder brauchbar. Auch lassen sich relativ gute Vergleiche zwischen MSS- und AVHRR-Evaluatio-

Tab. 5 : Verwendete Landsat-MSS- und NOAA/AVHRR-Daten (1982, 1985)

Datum	Sensor	Wolken- bedeckung	fehlende Bild- information	Frame
24-MAR-82	NOAA-7/AVHRR	0%	0%	-
25-MAR-82	Landsat-3/MSS	1%	19%	209/27
28-APR-82	NOAA-7/AVHRR	0%	0%	-
12-MAI-82	NOAA-7/AVHRR	0%	0%	-
18-MAI-82	Landsat-3/MSS	15%	13%	209/27
05-JUN-82	Landsat-3/MSS	21%	2%	209/27
11-JUL-82	Landsat-3/MSS	1%	3%	209/27+28
29-JUL-82	Landsat-3/MSS	11%	3%	209/27+28
29-MAR-85	Landsat-5/MSS	0%	-	195/27+28
29-MAR-85	NOAA-9/AVHRR	0%	-	-
18-APR-85	NOAA-9/AVHRR	0%	-	-
15-MAI-85	NOAA-9/AVHRR	0%	-	-
16-MAI-85	Landsat-5/MSS	9%	-	195/27+28
24-MAI-85	Landsat-4/MSS	7%	-	195/27
01-JUN-85	Landsat-5/MSS	7%	-	195/27+28
03-JUN-85	NOAA-9/AVHRR	0%	-	-
09-JUN-85	Landsat-4/MSS	15%	-	195/27+28
03-JUL-85	Landsat-5/MSS	0%	-	195/27+28

nen anstellen, wurden doch je drei Bilder praktisch zur selben Zeit aufgenommen.

In beiden Jahren ist es unumgänglich, MSS-Daten auszuwählen, die einen gewissen Bewölkungsgrad aufweisen (Tab. 5). Zusätzlich zeigen sich bei Landsat-3 Daten (1982) erhebliche Datenausfälle (Tab. 5).

Einige MSS-Szenen decken nicht das ganze Einzugsgebiet ab, so dass die südlich anschliessende Szene mit verwendet werden muss. Um die beiden Frames gemeinsam auswerten zu können, ist ein digitales Mosaikieren (Kapitel 6.4.4.) notwendig.

6.2. Geländemodell

Für das Gebiet Rhein-Felsberg steht ein Digitales Gelände-Modell (DGM) mit einer Rasterweite von 250m zur Verfügung. Es wird in dreifacher Hinsicht benötigt: Einmal für die Schneeauswertungen in mehreren Höhenzonen, wie sie im Abflussmodell erforderlich sind, dann zur Rekonstruktion der Schneedecke unter bewölkten Gebieten und drittens für die Herleitung der hypsographi-

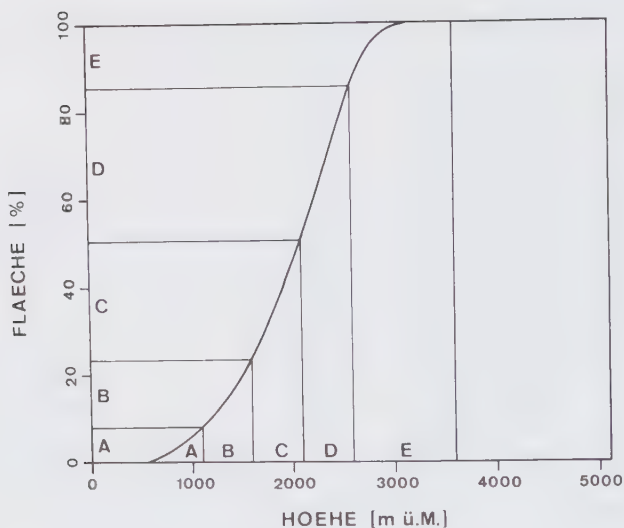


Abb. 16: Hypsographische Kurve und Einteilung des Einzugsgebiets Rhein-Felsberg in fünf Höhenstufen und die zugehörigen Flächen (A..E)

schen Kurve (Abb. 16). Das DGM stellt also einen unabdingbaren Bestandteil für digitale Schneeflächenbestimmungen und Abflusssimulationen dar.

Die Schneeauswertungen müssen für die einzelnen Höhenzonen getrennt durchgeführt werden (Kapitel 4.3.1.). Alle Modellvariablen und -parameter des SRM müssen auf diese Höhenzonen angewendet werden.

Die Einteilung eines Einzugsgebietes in Höhenzonen erfolgt in Intervallen von 500m wie es MARTINEC et al. (1983) vorschlagen. Eine weitere Möglichkeit bietet die Einteilung in flächengleiche Zonen mit Hilfe der hypsographischen Kurve (Area-Elevation Curve). Aus der hypsographischen Kurve kann neben der mittleren Zonenhöhe auch die zu einem Höhenbereich zugehörige Fläche ermittelt werden (Abb. 16).

Es stellt sich die Frage, wie fein die zonale Höhenauflösung bei der Verwendung eines Fernerkundungssystems mit einer bestimmten räumlichen Auflösung sein muss, damit die Schneeflächen noch präzise erfasst werden können (Kapitel 3.2.2.1.). Bei der Verwendung von Daten des grobauflösenden AVHRR-Systems kann nicht die gleiche Anzahl Höhenzonen verwendet werden wie beim Einsatz von MSS-Daten. Letztlich wird der Vergleich der Simulationen zeigen, welche zonale Gliederung bei welchem Sensorsystem sich am besten eignet (Kapitel 7.5.).

Für die Schneekartierungen wird das DGM unter Anwendung einer Interpolationsmethode von AKIMA (1974) für MSS-Auswertungen auf eine Rasterweite von 100m x 100m, für die AVHRR-Evaluationen auf eine von 500m x 500m interpoliert. Dabei wird gleichzeitig mit der Höhe für jeden Bildpunkt auch die Richtung der Flächennormale (Exposition und Hangneigung) berechnet (SEIDEL et al., 1983).

6.3. Bodenkontrolle

Als wichtige Grundlage für die folgenden geometrischen Auswertungen dient die Schweizerische Landeskarte mit den Massstäben 1:25'000, 1:50'000, 1:200'000. Für die geometrische Transformation der MSS-Daten werden Karten mit dem Massstab 1:50'000 verwendet. Bei der Transformation der AVHRR-Daten kommen die Karten 1:200'000 zum Einsatz. Karten im Massstab 1:25'000 werden beigezogen, um gewisse topographische Details in den Satellitenbildern zu überprüfen. Auch beim Bestimmen einzelner Stichproben (Kapitel 6.6.1.2.) bedeuten diese Karten eine wertvolle Hilfe.

Zusammen mit Feldbegehungen können Luftbilder in der Startphase des Projekts eine wertvolle Unterstützung darstellen. Sie werden anfänglich dazu verwendet, um in schwierigen Fällen die Stichproben präzise festzulegen und um die Klassifikationsresultate zu überprüfen. Zu einem späteren Zeitpunkt werden sie durch die Landeskarte 1:25'000 ersetzt.

Bei operationellen Schneekartierungen wird es allerdings nicht oft möglich sein, gleichzeitig mit den Satellitenüberflügen auch Luftbildbefliegungen durchführen zu können. Deshalb müssen Interpreten so ausgebildet werden,

dass sie aufgrund ihrer Geländekenntnisse und ihrer Erfahrung im Umgang mit Satellitenbildern in der Lage sind, Schneeauswertungen mit minimaler Bodenkontrolle vornehmen zu können.

6.4. Vorverarbeitung der Satellitendaten

Um die Satellitenbilder präzise auswerten und der weiteren Bearbeitung zuführen zu können, müssen die Originaldaten verschiedenen Vorverarbeitungsprozessen unterzogen werden. Folgende Verfahren werden angewendet:

- Umformatieren
- Korrektur von Daten- oder Systemfehlern
- Geokodierung von MSS- und AVHRR-Daten mittels geometrischer Transformation auf die Schweizerische Landeskarte
- Mosaikierung von MSS-Szenen
- Erstellen von digitalen Masken

Radiometrische und erste geometrische Vorverarbeitungsschritte von MSS-Daten werden bereits von der Empfangsstation in Fucino durchgeführt. Auf diese Korrekturen sei hier nicht mehr eingegangen, sondern auf das "LANDSAT DATA USERS HANDBOOK" (1980) verwiesen.

6.4.1. Umformatieren

Damit die MSS- und AVHRR-Originaldaten mit den Programmpaketen "PHOTOS" und "LIPS" (Kapitel 3.3.2.) verarbeitet werden können, müssen sie in das entsprechende Datenformat übertragen werden. Es soll hier nur ein Spezialfall beim Umformatieren von NOAA/ AVHRR-Daten diskutiert werden (FREI, 1984):

Kritisch beim Umformatieren der AVHRR-Daten ist die Reduktion der Videowerte von 10 auf 8 bit, d.h. die Einschränkung des Wertebereichs von 1024 auf 256. Dabei ist darauf zu achten, dass möglichst wenig Information verloren geht. Eine einfache Methode des Umformatierens besteht darin, jeweils vier aufeinanderfolgende Werte zu einem einzigen zusammenzufassen (Weglassen der "least-significant 2 bits").

Da NOAA-7 und -9 das Gebiet bei der mittäglichen Passage von Süden nach Norden überfliegen, erfolgt der besseren Anschaulichkeit wegen zusätzlich eine Umorientierung von Süd/Nord auf Nord/Süd.

6.4.2. Korrektur von Daten- und Systemfehlern

Landsat-3-Daten waren im Jahr 1982 besonders schweren Systemfehlern unterworfen, infolge derer der Satellit dann auch abgeschaltet werden musste. Auch die Datenübertragung war häufig gestört, so dass einzelne oder mehrere Zeilen ausfielen (Dropouts), d.h. die Information einer oder mehrerer Zeilen ging vollständig verloren. Mit der Rekonstruktion wird versucht, die Information über die Oberflächenstruktur mit möglichst hoher Genauigkeit wiederherzustellen.

Eine erste einfache Korrekturart stellt die lineare Interpolation dar. Ausgehend von den fehlerfreien Nachbarzeilen wird der arithmetische Mittelwert für jeden Bildpunkt einer Dropoutzeile bestimmt, indem der Videowert ober- und unterhalb des fehlenden Pixels gemittelt wird. Diese Methode eignet sich vor allem für einzeilige Dropouts.

Eine weitere Korrekturmöglichkeit bietet die lineare Regression. Bei diesem Ansatz wird die Korrelation zwischen den Spektralkanälen ausgenutzt. Fehlende Pixelwerte werden durch neue ersetzt, die sich aus den entsprechenden Werten der anderen MSS-Kanäle aufgrund des Korrelationskoeffizienten in fehlerfreien Bildteilen ergeben. Die Wahrscheinlichkeit, dass die wirkliche Information rekonstruiert werden kann, ist abhängig von der Redundanz zwischen den benutzten Kanälen. Die Methode versagt jedoch, wenn die Pixel oder Zeilen gleichzeitig in mehreren Kanälen ausfallen. Eine Rekonstruktion der schadhaften Zeilen ist in diesem Falle nicht mehr möglich.

Bei MSS- und AVHRR-Daten sind häufig Linien oder gar Kanäle gegeneinander verschoben. Diese Korrekturen werden durch optischen Vergleich auf dem Bildverarbeitungssystem interaktiv durchgeführt werden.

Der weitaus schlimmste Fehler besteht darin, dass systembedingt das westliche Drittel einer Landsat-MSS-Szene und damit ein Teil des Einzugsgebietes

nicht registriert wurde (Landsat-3). In Kapitel 6.8. wird eine Methode angegeben, wie auch eine Aussage über diese Gebiete abgeleitet werden kann, obwohl keine Fernerkundungsdaten vorliegen.

6.4.3. Geokodierung

Um die Satellitendaten mit dem DGM vereinigen zu können, müssen sie mit Hilfe einer geometrischen Transformation auf die Projektion der Schweizerischen Landeskarte, die auf einer schiefachsigen Zylinderprojektion beruht, abgebildet werden (Geokodierung).

Mit einer affinen Rückwärts-Transformation werden die Koordinaten des Satellitenbildes in diejenigen der Karte überführt. Die Parameter (Koeffizienten) der Abbildungsgleichung werden mit Hilfe von Passpunkten abgeleitet (KIRBY, 1975; Kapitel 3.3.2.). Zur Bestimmung der affinen Abbildungskoeffizienten wird ein überbestimmtes Gleichungssystem aufgestellt, d.h. mehr als drei Punktepaare werden benötigt.

Als Passpunkte kommen nur Elemente in Frage, die sowohl auf dem Satellitenbild als auch auf der Karte eindeutig identifiziert werden können. Pixel, die an einer Abgrenzung zwischen hellen und dunklen Objekten liegen (Wald/Feld, Land/Wasser) oder Kreuzungspunkte linearer Elementen (Autobahnkreuze, Flughäfen) sind als Passpunkte besonders geeignet.

Für Schneekartierungen in alpinem Gelände sind Kreten mit SE-Exposition für Passpunkte besonders geeignet, da sie der Sonne optimal ausgesetzt sind (Sonneneinstrahlung aus SE, da Ueberflug des Landsat um ca. 9.30 Uhr Ortszeit) und sich damit stark von der Umgebung abheben. In Bergregionen ist es oft äusserst schwierig und aufwendig, eine genügende Anzahl Passpunkte zu finden. Besonders, wenn eine starke Rückstrahlung herrscht (viel Schnee), ist es in gewissen Gebieten kaum mehr möglich, Passpunkte präzise festzulegen. Im Winter und auch nach Neuschneefällen im Frühjahr können markante Punkte oft nicht mehr ausgemacht werden, da die Reflexionsunterschiede durch den Schnee stark ausgeglichen werden.

Bei der Auswahl der Passpunkte muss man sich auch der Art und Weise bewusst sein, wie die Bilder aufgenommen werden: Da ein Pixel über ein oder mehrere Objekte zu liegen kommen kann, entstehen Mischpixel, in der multispektralen Bildverarbeitung Mixels (Mixed Picture Elements) genannt. Vom Interpretieren erfordert dies eine Abschätzung, ob ein Pixel markant genug ist, um als Passpunkt Verwendung zu finden. Ist ein Passpunkt zuwenig genau definiert, so werden die Abbildungskoeffizienten und damit auch die Transformation ungenauer.

Die Passpunkte aus den Satellitenbildern werden durch visuelle Interpretation auf dem digitalen Bildverarbeitungssystem mit RGB-Monitor in einer Falschfarbendarstellung (MSS-Kanäle 7→rot, 5→grün, 4→blau; AVHRR-Kanäle 2→rot, 2→grün, 1→blau) bestimmt: Ist ein geeigneter Punkt gefunden, so werden seine Lage im Bild (Zeile und Kolonne) und die Kartenkoordinaten (x, y) in die Ausgleichsrechnung mit einbezogen. Dieses Verfahren wird solange ausgeführt, bis ca. 15 Passpunkte pro Bildausschnitt (512 x 512 Pixel) gefunden sind.

Resultat der Ausgleichsrechnung sind neben den affinen Abbildungskoeffizienten Residuen für jeden verwendeten Passpunkt. Dies eröffnet die Möglichkeit, einzelne Passpunkte zu verwerfen und durch neue zu ersetzen. Die Passpunkt-auswahl und Koeffizientenbestimmung kann erst dann abgeschlossen werden, wenn die Werte für den Standardfehler kleiner als 1 sind. Die Koeffizienten dienen dann als Input für die eigentliche Transformation.

6.4.3.1. Transformation und Resampling von Landsat-MSS-Daten

Die relativ feine räumliche Auflösung der MSS-Daten gestattet eine recht genaue Bestimmung der Passpunktkoordinaten, erfordert aber einen grossen Zeitaufwand. Es empfiehlt sich auf jeden Fall, diesen Aufwand auf sich zu nehmen, da die Genauigkeit aller weiteren Auswertungen – besonderes bei der Überlagerung mehrerer Informationsquellen zu einem multivariaten Datensatz – von diesem Schritt abhängig ist.

Gleichzeitig mit der Transformation von MSS-Daten erfolgt ein Resampling, das eine neue Maschenweite von 100m definiert, wie sie bereits für das DGM

(Kapitel 6.2.) eingeführt worden ist. Bei der Zuordnung der Werte im 100m Raster werden jeweils die nächsten Nachbarn (Nearest-Neighbours) berücksichtigt. Dadurch erreicht man, dass die Original-Kontraste im Bild erhalten bleiben (Kapitel 3.3.2.1.).

6.4.3.2. Transformation und Resampling von NOAA/AVHRR-Daten

Es werden nur AVHRR-Daten verwendet, in denen das Einzugsgebiet Rhein-Felsberg in die Nähe der Nadirlinie, d.h. innerhalb eines Abtastwinkels von $\pm 20^\circ$ (± 340 Pixel) liegt. Die panoramischen Verzerrungen sind in diesem Bereich so klein, dass sie vernachlässigt werden können. Auch der Skew ist für die Grösse des Testgebietes relativ gering, so dass die restlichen Abweichungen durch die anschliessende affine Transformation genügend genau korrigiert werden können.

Bei AVHRR-Daten wird die Auswahl von Passpunkten erschwert, fallen doch gerade die präzisen, linearen Elemente ausser Betracht, da sie nicht mehr erkennbar sind. Uebrig bleiben vorab Grenzen zwischen markanten Flächen, meistens Land/Wasser (Seeränder), die als Passpunkte benutzt werden können.

Auch bei NOAA/AVHRR-Daten erfolgt gleichzeitig ein Nearest-Neighbour-Resampling. Einziger Unterschied ist die Einführung einer Rasterweite von 500m. Eine Anpassung an den 100m x 100m Raster ist nicht sinnvoll, da ein pixelweiser Vergleich mit den Landsat-MSS-Daten nicht angebracht ist. Eine Interpolation auf 1000m x 1000m sollte nicht durchgeführt werden, da gleichzeitig auch der Raster des DGM's auf 1000m x 1000m interpoliert werden müsste. Eine Interpolation von 250m auf 1000m würde das Gelände nicht mehr mit dem nötigen Detaillierungsgrad wiedergegeben, d.h. Extremwerte würden ausgeglichen. Als Kompromiss stellen die 500m x 500m eine sinnvolle Rastergrösse dar.

Das weitere Vorgehen bei der Verarbeitung von MSS- und AVHRR-Daten unterscheidet sich grundlegend: Für MSS-Daten folgt auf die Passpunkt- und Koeffizientenbestimmung die affine Transformation und das Resampling, gefolgt von der Klassifikation. Für die AVHRR-Daten lautet die Reihenfolge: Passpunktbestimmung, Klassifikation, Transformation und Resampling. Dieses un-

terschiedliche Vorgehen ist bedingt durch den grossen Einfluss des Resamplings auf die Originaldaten. Bei AVHRR-Daten sind die Uebergänge vom Grauton eines Objektes zum Grauton eines andern, bedingt durch die geringere Auflösung und folglich den vielen Mischpixeln, völlig fliessend. Sogar ein Near-est-Neighbour-Resampling kann in diesem Fall schon beträchtliche Auswirkungen zeigen. Es empfiehlt sich deshalb, soweit wie möglich mit den Originaldaten zu arbeiten, um beim Bestimmen der Stichproben am digitalen Bildverarbeitungssystem nicht durch neue Farbtöne getäuscht zu werden. Bei MSS-Daten drängt sich dieses Vorgehen nicht auf, weil dadurch mit der relativ grossen Originaldatenmenge gearbeitet werden müsste, was lediglich mehr Aufwand, jedoch keinen Nutzen bringen würde. Der Uebersicht halber wird das Vorgehen jedoch für MSS- und AVHRR-Daten parallel besprochen.

6.4.4. Mosaikieren von Landsat-MSS-Szenen

Das Einzugsgebiet Rhein-Felsberg liegt im Ueberlappungsbereich zweier Landsat-Frames ("Bodensee": 194/027 und "Mailand": 194/028 bzw. 209/027-028 für Landsat-3). Es müssen deshalb häufig beide Szenen verwendet werden (Tab. 5). Da die Frames zuvor geometrisch auf dasselbe Koordinatensystem transformiert worden sind, können die beiden Szenen ohne weiteres zusammengesetzt werden. Die Frames weisen einen gewissen Ueberlappungsbereich (Nord-Süd) und eine seitliche Verschiebung (West-Ost) auf. Im Nord-Süd-Ueberlappungsbereich werden für beide Frames Kontrollpunkte gewählt und deren Koordinaten bestimmt. Die Verschiebungswerte zwischen den Kontrollpunkten können in x- und y-Richtung leicht berechnet werden. Nachdem diese Werte bekannt sind, bietet das Zusammenfügen keine Schwierigkeiten mehr.

6.4.5. Erstellen digitaler Wolken- und Gebietsmasken

6.4.5.1. Wolkenmaskierung bei Landsat-MSS-Daten

Da bei Landsat-MSS-Daten eine Unterscheidung zwischen Wolken und Schnee basierend auf spektralen Kriterien nicht möglich ist, muss nach einem anderen Verfahren gesucht werden: Das menschliche Auge ist fähig, neben den spektralen noch zusätzliche Eigenschaften zur Wolkenerkennung beizuziehen. Anhand

von Wolkenformen, -texturen und -schatten gelingt es, Wolken und Schnee mittels visueller Interpretation zu separieren. Auf dem interaktiven Bildverarbeitungssystem werden in einer Falschfarbendarstellung (MSS-Kanäle 7→rot, 5→grün, 4→blau) alle Wolken und deren Schatten abgegrenzt und eine sogenannte Maske erstellt. Diese Wolkenmaske wird in einem separaten Datenfile gespeichert.

Für die unter diesen Masken liegenden Flächen muss die Schneebedeckung rekonstruiert werden (Kapitel 6.8.). Wie aufwendig sich diese Arbeiten gestalten, hängt in erster Linie von der Wolkenart und erst in zweiter vom Anteil der Bewölkung ab. Existieren viele kleine Wolken ("Schäfchenwolken"), so kann der interaktive Interpretationsaufwand mehrere Stunden betragen.

Eine gewisse Vereinfachung des Vorgehens kann vorgenommen werden: Alle Wolken, die sicher über aperen Gebieten liegen (Entscheid durch den Interpret), werden in der Maske sofort als "aper" gekennzeichnet.

6.4.5.2. Wolkenmaskierung bei NOAA/AVHRR-Daten

Bei NOAA/AVHRR-Daten ist es möglich, mit Hilfe der Spektralkanäle Wolkenmasken automatisch zu erstellen. Kanal 3 zusammen mit Kanal 1 oder 2 erlaubt eine Unterscheidung von Schnee und tiefen Wolken (Abb. 17). Kanal 4 zusammen mit Kanal 3 lässt die Trennung Schnee – hohe Wolken (kälter als Schnee) zu (Abb. 17). Kalte und warme Wolken können mit den Kanälen 3 und 4 bzw. 5 differenziert werden. Vorsicht ist geboten, wenn sich Dunst oder Nebel über einem Teil des Einzugsgebietes befinden. Solche Erscheinungen können zu gravierenden Fehlinterpretationen führen (DENEAU et al., 1981).

Die Wolkenmasken für diese Daten werden nicht gleichzeitig mit der Schneeklassifikation durchgeführt, sondern in einer separaten Klassifikation, da sonst zu grosse Fehlzuordnungen auftreten würden. Ein derartig hierarchisches Vorgehen wurde unter anderem von ITTEN et al. (1985) vorgeschlagen. Oft ist es jedoch einfacher, besonders bei geringer Bewölkung, die notwendigen Wolkenmasken ebenfalls am Bildverarbeitungssystem interaktiv festzulegen. Die Rekonstruktion der Schneeflächen unter den Wolkenmasken wird in Kapitel 6.8. behandelt.

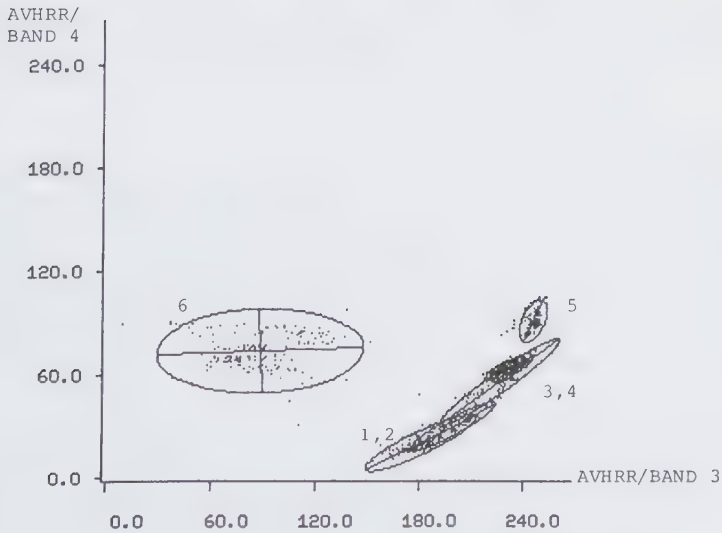
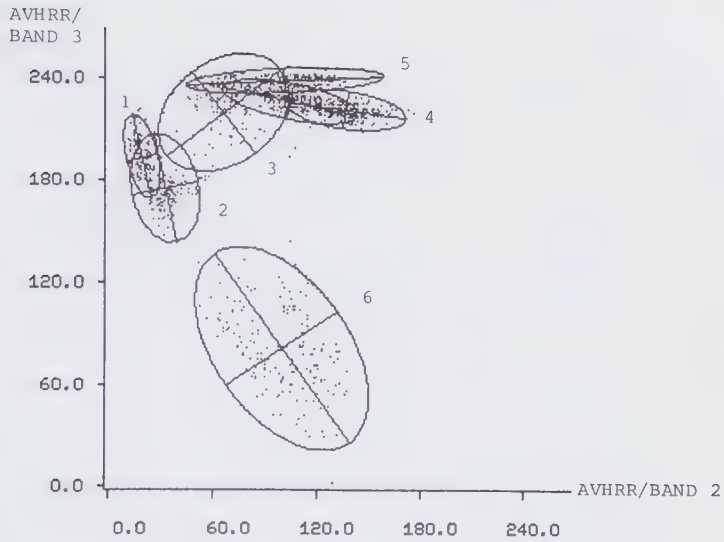


Abb. 17: Spektrale Trennbarkeit von Wolken und Schnee mit NOAA/AVHRR-Daten

- | | |
|--------------------------|------------------------|
| 1) Wald | 4) Schnee (Sonnenlage) |
| 2) Wiesen, Alpweiden | 5) Wolken (hoch) |
| 3) Schnee (Schattenlage) | 6) Wolken (tief) |

6.4.5.3. Gebietsmaske

Für Schneeflächenbestimmungen ist es unumgänglich, eine digitale Maske des Einzugsgebietes zu erstellen. Hierzu wird das Einzugsgebiet Rhein-Felsberg aus der Landeskarte 1:50'000 mit einer Rasterweite von 100m mit Hilfe eines Koordinatenlesers (Digitalisiertablet) digitalisiert und als Maske in einem Datenfile gespeichert. Zudem werden fünf Teilgebiete abgegrenzt, die in der Maske des Einzugsgebiets separat kodiert sind. Diese Unterteilung ist für die Abschätzung der klimatischen Einflüsse auf die spätere Abflussimulationen (Kapitel 7.3.) notwendig.

6.5. Selektion von Merkmalen

Die Kanalauswahl (Kapitel 3.3.1.) wird nach Angaben von TOWNSHEND & TUCKER (1981) und RANGO (1985a) durchgeführt und anhand von Testklassifikationen für das eigene Untersuchungsgebiet kontrolliert (Kapitel 6.9.1.). Beste Klassifikationsergebnisse bei Schneekartierungen werden bei der Verwendung der Landsat-MSS-Kanäle 5 und 7 sowie der NOAA/AVHRR-Kanäle 1 und 2 erreicht.

6.6. Klassifikation: Ueberwachtes Lernen und multispektrales Zuordnen

In einem ersten Schritt muss ein geeignetes Klassifikationsschema mit den zu klassierenden Kategorien aufgestellt werden (Kapitel 6.6.1.1.). Aufgrund dieses Schemas werden anschliessend für jede Kategorie Trainingsstichproben (Kapitel 6.6.1.2.) erhoben und das geeignete Zuordnungskriterium (Kapitel 6.6.1.3.) bestimmt. Dann wird jedes Bildelement der zu bearbeitenden Szene seiner entsprechenden Kategorie zugeordnet (Kapitel 6.6.2.).

Nachdem die Schneebedeckungen für die einzelnen Satellitenbilder bestimmt sind, wird aus den digitalen Schneebedeckungskarten, dem DGM und der Gebietsmaske ein multivariater Datensatz zusammengestellt (Kapitel 6.7.). Er bildet die Grundlage für die zonale Schneeflächenbestimmungen und die Rekonstruktion der Schneefläche in bewölkten oder fehlenden Bildteilen (Kapitel 6.8.).

Im abschliessenden Kapitel (6.9.) wird die Genauigkeit der Schneekartierungen diskutiert.

6.6.1. Lernen

6.6.1.1. Klassifikationsschema

Die Genauigkeit einer Auswertung nimmt signifikant zu, wenn ein detailliertes Klassifikationsschema mit den zu klassierenden Kategorien eingeführt wird. Es reicht nicht aus, nur die für die Schneebedeckungskarten notwendigen Kategorien (aper, Uebergangszone, schneebedeckt) zu berücksichtigen. Ziel ist es, den n -dimensionalen Merkmalsraum mit Hilfe der Trainingsstichproben möglichst eindeutig und widerspruchsfrei aufzuteilen. Es müssen deshalb mehrere Subkategorien gewählt werden, um bei der nachfolgenden statistischen Zuordnung einen möglichst engen Spielraum zu lassen.

Bei der Aufstellung des Schemas ist unbedingt darauf zu achten, dass die gewählten Subkategorien (Tab. 6) aufgrund ihrer spektralen Charakteristika mit den vorhandenen Sensoren überhaupt unterschieden werden können.

Ein erster Schritt bei der Bestimmung dieses Schemas ist die Erörterung der Datenstruktur anhand von Histogrammen und Scatterogrammen (zweidimensionale Histogramme) aufgrund von Stichproben der verschiedenen Subkategorien. Die Erhebung einer Subkategorie erfolgt aufgrund von Luftbildern, Feldbegehungen oder andern Grundlagen (thematische Karten, Daten von statistischen Ämtern und à-priori-Wissen). Die Stichproben geben Aufschluss darüber, ob das Erheben einer bestimmten Subkategorie überhaupt sinnvoll ist. Diese Stichproben sind jedoch nicht mit den später verwendeten Trainingsstichproben identisch. Zeigen diese Darstellungen keine oder nur wenig Überlappung zwischen den Messwerten der verschiedenen Subkategorien, dann können sie akzeptiert werden. Weisen zwei oder mehr Subkategorien hingegen eine signifikante Überlappung in einem oder mehreren Kanälen auf, dann bestehen berechnete Zweifel über deren Trennbarkeit. Sobald eine befriedigende Trennung zwischen den einzelnen Subkategorien erreicht worden ist, kann mit der Auswahl von Trainingsstichproben begonnen werden.

Tab. 6 : Klassifikationsschema für Landsat-MSS-Daten

Kategorie	Subkategorie
Aper	Wasser
	Wald
	Getreidefelder
	Wiesen
	Weiden
	Vernässungszone (Grasland)
Uebergangszone	Fels
	Sonnenexponiert
	Schattenlage
Schneebedeckt	Schnee, feucht
	Schnee, trocken
	Schnee, Schattenlage

Nicht alle der aufgeführten Subkategorien (Tab. 6) werden in jedem Bild gebraucht. Ihr Einsatz ergibt sich aus dem Stand der Ausaperung. Es wäre z.B. nicht sinnvoll, bei einer hohen Schneebedeckung die Kategorien "Wasser" oder "Wiesen" einzuführen. Bei solchen Verhältnissen ist es im Gegenteil wichtiger, die Kategorie "schneebedeckt" stärker zu unterteilen. Unsorgfältig ausgewählte Kategorien und Subkategorien können schwerwiegende Fehlklassifikationen verursachen.

Ein Beispiel dafür stellt die "Vernässungszone" dar. Diese Zone liegt zwischen den schneebedeckten und bereits ausgeaperten Regionen und tritt praktisch nur während der Zeit maximaler Schneeschmelze auf: Schmelzwasser rinnt oberflächlich in bereits schneefreies Gebiet. Dieses wird vollständig mit Wasser durchtränkt, wodurch sich das Reflexionsverhalten verändert. Wird dies bei der Aufstellung des Klassifikationsschemas nicht berücksichtigt, so muss damit gerechnet werden, dass die Trennlinie (Schneegrenze) zwischen "schneebedeckt" und "aper" nicht genügend präzis festgelegt werden kann. Diese Linie wird aufgrund des Klassifikationsalgorithmus nach statistischen Kriterien "irgendwo" zwischendurch verlaufen. Gerade die Schneegrenze ist aber für die genaue Klassifikation massgebend. Nach der Erhebung dieser zusätzlichen Subkategorie wird die Schneegrenze zwischen den Kategorien "aper" und "schneebedeckt" viel genauer festgelegt.

Besondere Beachtung muss der Kategorie "Uebergangszone" geschenkt werden. Sie stellt Gebiete zwischen der schneebedeckten und der aperen Zone dar; sie

ist teilweise schneefrei, jedoch mit Schneeflecken durchsetzt. Beim Bestimmen der Stichproben für diese Kategorie werden Pixel berücksichtigt, die zwischen 25% und 75% mit Schnee bedeckt sind. Bei der Verwendung von MSS-Daten können auch bei einer Auflösung von 100m x 100m solche Details noch erkannt werden, weshalb die Einführung der "Uebergangszone" sinnvoll ist.

Bedingt durch das gröbere Auflösungsvermögen können die Klassifikationen mit NOAA/AVHRR-Daten nicht im gleichen Detaillierungsgrad durchgeführt werden. Die Kategorie "Uebergangszone" lässt sich nicht mehr erheben. Zwischen "Schnee in Schattenlagen" und "Uebergangszone" z.B. kann nicht mehr differenziert werden, da das kleinräumige Relief die Aufnahmeverhältnisse beeinflusst. Wie DENEAU et al. (1981) festhielten, kommt zum Reliefeinfluss noch hinzu, dass die Videowerte praktisch fließend von "aper" zu "schneebedeckt" übergehen. Das Festlegen einer Uebergangszone anhand von Histogrammen ist nicht eindeutig möglich.

Diese Situation wird durch folgende Umstände verstärkt: Bedingt durch das gröbere Auflösungsvermögen der AVHRR-Daten erreichen die Videowerte im späten Frühjahr und im Sommer den Sättigungswert von 255 nur noch, wenn Neuschnee gefallen ist. Durch die in allen Höhenzonen gleichzeitig stattfindende Ausaperung existieren in dieser Zeit viele kleine, ausgeaperte Gebiete (Felsen, Lawinenanrisse, usw.). Wird eine Schneedecke in diesem Zustand aufgenommen, so entstehen praktisch nur Mischpixel. Unter solchen Bedingungen ist es oft schwierig, eine Trennung zwischen den Kategorien "aper" und "schneebedeckt" festzulegen.

6.6.1.2. Stichprobenerhebung

Die für überwachte Klassifikationsverfahren benötigten Stichproben werden durch speziell ausgewählte Ausschnitte in einem Satellitenbild bestimmt. Jedem der Punkte in diesen Ausschnitten wird eine Subkategorie aus dem zuvor gewählten Klassifikationsschema zugeordnet. Die Stichproben müssen für jede Kategorie repräsentativ sein. Zudem sollte die Grauwertverteilung dieser Daten für jede Subkategorie annähernd mit der vom Zuordnungsgesetz vorausgesetzten Verteilung, üblicherweise der Normalverteilung, übereinstimmen.

Durchschnittlich werden für einen Bildausschnitt von 512 x 512 Pixel 80 Stichprobenpixel pro Kategorie erhoben.

Unsorgfältig ausgewählte Stichproben können eine Verfälschung des tatsächlichen Vorkommens einer Subkategorie hervorrufen und eventuell sogar dazu führen, dass eine Subkategorie fälschlicherweise aufgehoben wird (da sie mit anderen überlappt). Besonders die Kategorie "Uebergangszone" stellt grosse Anforderungen an den Interpreten: Die Farbtöne der Bildelemente innerhalb dieser Kategorie können sehr stark variieren, abhängig von der Exposition, dem Verschmutzungsgrad, der prozentualen Mischung mit andern Objekten (Mischpixel) sowie der prozentualen Schneebedeckung (25-75%). Abb. 18 zeigt deutlich die Variationen der "Uebergangszone" im Verlaufe der Ausaperungsperiode und ihre Aufteilung in zwei Subkategorien während der Schneeschmelze. Ebenso kommt die abnehmende Bedeutung der verschiedenen Schneekategorien bzw. die Zunahme des Einflusses der Vegetationskategorien während der Ausaperungsperiode zum Ausdruck.

Für eine exakte Klassifikation sind diese Gegebenheiten äusserst wichtig und dürfen nicht unterschätzt werden. Bei der Stichprobenwahl ist der Interpret in einem ständigen Konflikt, da sein Auge die Farbdifferenzen nicht absolut, sondern in Bezug auf seine Umgebung wahrnimmt. Die Farbtöne für eine gewisse Subkategorie unterscheiden sich aber auch zwischen Bildern mit unterschiedlichen Aufnahmedaten, so dass sich der Interpret bei jedem neuen Bild wieder anderen Gegebenheiten anpassen muss. Die Bestimmung der Stichproben muss deshalb meistens mehrere Male wiederholt werden, bis ein akzeptabler Stichprobensatz vorliegt.

6.6.1.3. Zuordnungskriterium

Aufgrund der Trainingsdaten wird ein Zuordnungskriterium (Decision Rule) bestimmt. Basierend auf diesem Kriterium werden dann alle Pixel eines Datensatzes (Satellitenbildes) ihren entsprechenden Subkategorien zugeordnet.

Alle Bilder werden mit den zur Verfügung stehenden Algorithmen (Minimum-Distance-, Mahalanobis-Distance- und Maximum-Likelihood-Klassifikator) am interaktiven Bildverarbeitungssystem einer Testklassifikation unterzogen.

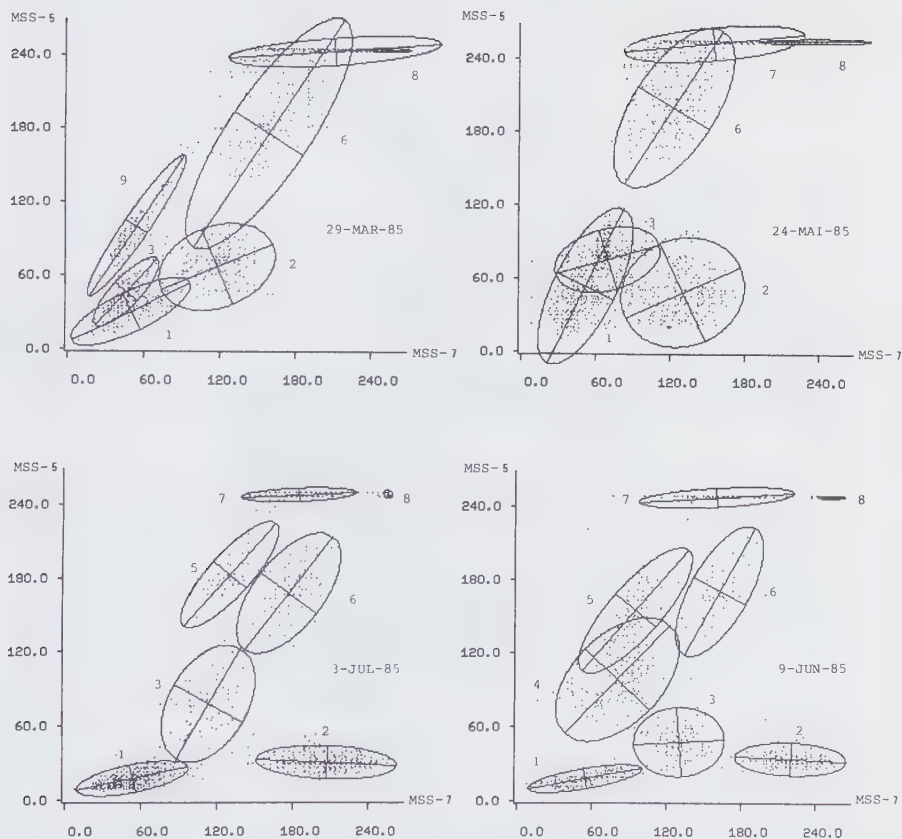


Abb. 18: Variation der Subkategorien im Verlauf einer Ausaperungsperiode (Landsat-MSS, 1985)

- | | |
|---------------------|---------------------|
| 1) Wald | 6) Uebergangszzone |
| 2) Wiesen | (Sonnenlage) |
| 3) Alpweiden | 7) Schnee (feucht) |
| 4) Vernässungszzone | 8) Schnee (trocken) |
| 5) Uebergangszzone | 9) Schnee |
| (Schattenlage) | (Schattenlage) |

Die Ergebnisse dieser Klassifikationen werden verglichen. Die Entscheidung, welcher Klassifikationsalgorithmus schliesslich verwendet wird, muss vom Interpreten aufgrund dieser Ergebnisse und seines zusätzlichen Wissens (Erfahrung) und anhand von Bodenkontrolldaten gefällt werden (Kapitel 6.9.1.). Meistens wird in dieser Untersuchung der Minimum-Distance Klassifikator eingesetzt.

6.6.2. Zuordnen

Bei der Klassifikation wird aufgrund der in Kapitel 6.6.1.3. bestimmten Zuordnungskriterien und der Stichprobenstatistik jedes Pixel seiner entsprechenden Kategorie zugewiesen. Da die Satellitenbilder bei unterschiedlichen Beleuchtungsverhältnissen und atmosphärischen Bedingungen aufgenommen worden sind, muss der Zuordnungsprozess individuell für jede Szene durchgeführt werden.

In dieser Untersuchung ist allein die zeitlich variierende, relative Schneebedeckung in jeder Höhenzone von Interesse. Deshalb werden die für MSS-Auswertungen notwendigen Subkategorien zu den folgenden drei Hauptkategorien zusammengefasst: "aper", "schneebedeckt" und "Uebergangszone". Dabei wird angenommen, dass jedes Pixel der Uebergangszone zu 50% schneebedeckt ist. Bei NOAA/AVHRR-Evaluationen erfolgt eine Zusammenfassung in die Kategorien "aper" und "schneebedeckt", d.h. ohne die Kategorie "Uebergangszone".

Das Resultat dieses Zuordnungsprozesses sind thematische Karten, welche die Schneeverteilung innerhalb des Testgebietes wiedergeben (Abb. 19). Die vollständige Zusammenstellung aller Schneebedeckungskarten für 1982 und 1985 ist im Anhang I zu finden. Diese Karten bilden die Grundlage für die folgenden flächenstatistischen Auswertungen, die getrennt nach Höhenzonen und Teilgebieten (Kapitel 7.3.) durchgeführt werden. Die zonale Gliederung wird den bereits von MARTINEC (1970) im Dschma verwendeten Höhenstufen angepasst:

Zone A	560-1100m ü.M.
Zone B	1100-1600m ü.M.
Zone C	1600-2100m ü.M.
Zone D	2100-2600m ü.M.
Zone E	2600-3600m ü.M.

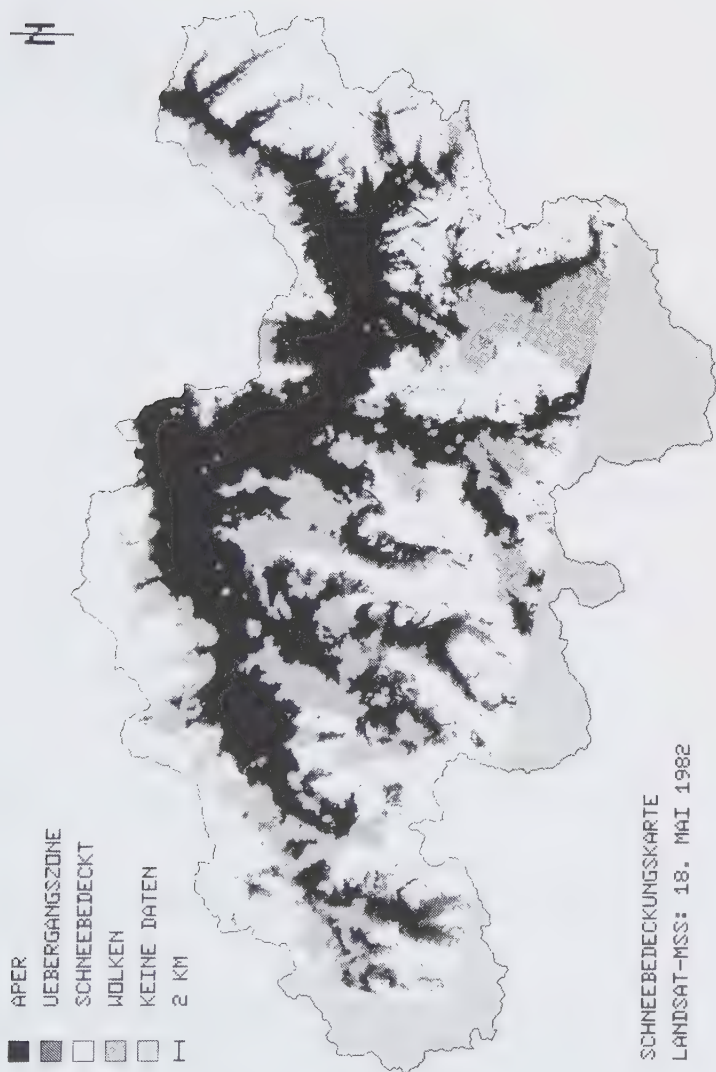


Abb. 19: Beispiel einer Schneebedeckungskarte (Rhein-Felsberg, 18. Mai 1982)

6.7. Multivariater Datensatz

Die pixelgenaue Ueberlagerung von Daten verschiedenen Ursprungs erfordert ein gemeinsames Koordinatensystem (Kapitel 3.3.2.). Da die Koordinatentransformation auf das System der Schweizerischen Landeskarte durchgeführt worden ist (Geokodierung), ist diese Bedingung erfüllt. Jedem Pixel aus einem klassifizierten Bild kann somit das entsprechende Pixel zugeordnet werden, das Höhe, Exposition, Neigung und Zugehörigkeit zu einem bestimmten Teilgebiet ("Region of Interest" = ROI) angibt.

Die praktische Durchführung der digitalen Ueberlagerung erfolgt durch die Vereinigung der einzelnen Daten zu einem n-Kanalbild, wobei n die Anzahl verschiedener Daten bedeutet. Zur Ueberlagerung gelangen die Daten von Höhe, Exposition, Hangneigung, der "ROI" und der einzelnen klassifizierten Bilder, wodurch multivariate Datensätze entstehen. Für die beiden ausgewerteten Jahre (1982/ 1985) und für die beiden Sensorsysteme (MSS/AVHRR) werden getrennte Datensätze erstellt:

- 9-Kanal Datensatz, basierend auf fünf MSS-Auswertungen (1982)
- 7-Kanal Datensatz, basierend auf drei AVHRR-Auswertungen (1982)
- 10-Kanal Datensatz, basierend auf sechs MSS-Auswertungen (1985)
- 8-Kanal Datensatz, basierend auf vier AVHRR-Auswertungen (1985)

Der Einfachheit halber werden vor der Bildung eines multivariaten Datensatzes in einem ersten Schritt die klassifizierten Bilder mit den zugehörigen Wolkenmasken überlagert. Die klassifizierten Bilder belegen dann zu den Videowerten 1 (aper), 2 (Uebergangszone) und 3 (schneebedeckt) auch noch die Werte 128 und 255 für fehlende bzw. bewölkte Bildteile (Tab. 7).

Tab. 7 zeigt am Beispiel des 9-Kanal-Datensatzes (MSS 1982) die Zuordnung der Videowerte. Die ersten vier Kanäle der vier verschiedenen multivariaten Datensätze bleiben immer dieselben: Kanäle 1 bis 3 stellen die drei Klassen des DGM's dar und Kanal 4 die "ROI", in der die Zugehörigkeit zu einer der fünf Teilgebiete kodiert ist. Die Gliederung in Teilgebiete wird für die in Kapitel 7.3. beschriebene gebietsweise Simulation des Schmelzwasser-Abflus-

Tab. 7 : Zuweisung der Videowerte in einem multivariaten Datensatz (MSS 1982)

Kanal	Videowert	Bezeichnung/Kode	
1	0 - 255	DGM: Höhe	0 ... 5110m ü.M.
2	0 - 90	DGM: Exposition	0 ... 360 Grad
3	0 - 180	DGM: Neigung	0 ... 90 Grad
4	8	ROI: Tiefencastel	
	16	ROI: Hinterrhein	
	32	ROI: Landwasser	
	64	ROI: Vorderrhein	
	128	ROI: Ilanz	
5	1	MSS: 25-MAR-82	Aper
	2	"	Uebergangszone
	3	"	Schneebedeckt
	128,255	"	Bewölkte, fehlende Bildteile
6	1	MSS: 18-MAI-82	Aper
	2	"	Uebergangszone
	3	"	Schneebedeckt
	128,255	"	Bewölkte, fehlende Bildteile
7	1	MSS: 05-JUN-82	Aper
	2	"	Uebergangszone
	3	"	Schneebedeckt
	128,255	"	Bewölkte, fehlende Bildteile
8	1	MSS: 11-JUL-82	Aper
	2	"	Uebergangszone
	3	"	Schneebedeckt
	128,255	"	Bewölkte, fehlende Bildteile
9	1	MSS: 29-JUL-82	Aper
	2	"	Uebergangszone
	3	"	Schneebedeckt
	128,255	"	Bewölkte, fehlende Bildteile

ses nötig. Der fünfte und alle folgenden Kanäle sind jeweils mit den klassifizierten Bildern belegt.

6.8. Auswertung von bewölkten Regionen und Restauration fehlender Bildteile

Da der Schneebedeckungsgrad im ganzen Einzugsgebiet flächendeckend ermittelt werden soll, muss nach einem Weg gesucht werden, wie die Schneedecke in den fehlenden oder bewölkten Bildteilen rekonstruiert werden kann. Mit der im folgenden beschriebenen Methode wird ein Modell benutzt, das auf dem DGM und den klassifizierten Bildern basiert.

6.8.1. Modellgestützter Ansatz

Gesamthaft müssen die Schneebedeckungen für 8 Landsat-MSS-Bilder (Rhein-Felsberg) mit einer unterschiedlichen Anzahl fehlender und bewölkter Pixel (3-28%) rekonstruiert werden. Dabei kann der modellgestützte Ansatz zum ersten Mal in einem grösseren Rahmen getestet werden.

Unter der Voraussetzung, dass der Schnee innerhalb einer bestimmten Reliefklasse nach gleichen Gesetzmässigkeiten verteilt ist, kann in klimatologisch einheitlichen Teilgebieten die Schneebedeckung von Teilgebieten repräsentativ für das ganze Gebiet sein. Der Ansatz postuliert, dass Pixel mit gleicher Höhe, Exposition und Neigung – im folgenden in Klassen eingeteilt und deshalb als Reliefklassen bezeichnet – im gesamten Einzugsgebiet dieselbe relative Schneebedeckung aufweisen. Diese Annahme erlaubt den Schluss, dass die Schneebedeckung eines bewölkten Pixels dieselbe sein muss, wie für ein wolkenfreies Pixel der gleichen Reliefklasse. Durch eine Extrapolation kann von der relativen Schneebedeckung der wolkenfreien auf diejenige der bewölkten Bildteile geschlossen werden. Die Richtigkeit dieser Annahme wurde von LICHTENEGGER et al. (1981) aufgezeigt, waren doch Abweichungen von nur ca. 2% zu verzeichnen.

Für die Extrapolation der Schneedecke unter bewölkten Bildteilen wird das Kontinuum von Höhen-, Expositions- und Neigungswerten in 205 Reliefklassen unterteilt (Tab. 8).

Tab. 8 : Einteilung des Digitalen Gelände-Modells in 205 Reliefklassen

5 Höhenzonen:	Zone A:	560–1100m ü.M.
	Zone B:	1100–1600m ü.M.
	Zone C:	1600–2100m ü.M.
	Zone D:	2100–2600m ü.M.
	Zone E:	2600–3600m ü.M.
entsprechend den in Kapitel 6.6.2. festgelegten Zonen		
8 Expositionsklassen:	N, NE, E, SE, S, SW, W, NW	
5 Hangneigungsklassen:	1–15°, 16–22°, 23–28°, 29–36°, >37°	
	1 Klasse pro Höhenzone für flaches Gelände (Neigung 0°)	

Unter obiger Voraussetzung, dass für jede Relief-Klasse eine einheitliche relative Schneebedeckung angenommen werden darf, kann der Summe aller fehlenden Pixel dieselbe relative Schneebedeckung zugeordnet werden, wie sie für die entsprechende Klasse im nicht bewölkten Teil vorkommt. Eine Aussage über relative Schneebedeckungen im gesamten Einzugsgebiet ergibt sich durch die gewichtete Summierung über alle Reliefklassen gemäss der Formel:

$$STOT_{rel} = \frac{\sum_{i=1}^N \left[S_i + \frac{1}{2} U_i \right] \left[1 + \frac{B_i}{F_i} \right]}{\sum_{i=1}^N [F_i + B_i]}$$

wobei

$STOT_{rel}$	= Totale, relative Schneebedeckung
S_i	= Schneebedeckte Pixel pro Reliefklasse in F_i
F_i	= Wolkenfreie Pixel pro Reliefklasse
U_i	= Uebergangspixel pro Reliefklasse in F_i
B_i	= Bewölkte Pixel pro Reliefklasse
N	= Reliefklassen (205)

Es gilt zu beachten, dass in dieser Formel die Uebergangszone bei der Extrapolation mit einer Gewichtung von 50% berücksichtigt wird, d.h. zur Hälfte als schneebedeckt angenommen wird.

Wie unsere Untersuchungen zeigen, kann, falls für die Kategorien "schneebedeckt" und "Uebergangszone" alle Reliefklassen statistisch genügend häufig vorhanden sind, von 30-50% wolkenfreien auf die bewölkten Bildsegmente geschlossen werden.

Eine entsprechende Extrapolationsformel lässt sich natürlich auch für jede Höhenzone separat aufstellen, sodass eine Schneebedeckung für jede Höhenzone getrennt gemacht werden kann, wie es das SRM verlangt.

Eine entsprechende Extrapolationsmethode ist bei den verwendeten NOAA/AVHRR-Daten nicht notwendig, da stets Bilder mit möglichst geringer Bewölkung ausgewählt wurden. Die wenigen Wolkenteile werden am Bildverarbeitungssystem manuell und pixelweise den aperten bzw. schneebedeckten Kategorien zugeordnet.

Durch dieses Extrapolationsverfahren gelingt es, die relative Schneebedeckung über das ganze Einzugsgebiet und aufgeteilt nach Höhenzonen auszuwerten, wie es das SRM verlangt.

6.8.2. Restauration durch Substitution

Es gibt Beispiele, wo der eben erwähnte modellgestützte Ansatz versagt. Nämlich dann, wenn für eine Reliefklasse nicht eine minimale Anzahl klassierbarer Pixel vorliegt.

Eine Möglichkeit, die Schneedecke in derartigen Bildteilen zu rekonstruieren, besteht in deren Substitution durch entsprechende Teile aus anderen Aufnahmen. In unserem Fall darf die Substitution jedoch nur durch Bilder mit ähnlicher Schneebedeckung erfolgen. Bilder nach erfolgtem Neuschneeefall oder nach starkem Rückschmelzen der Schneedecke dürfen nicht beigezogen werden. Hingegen können Daten aus verschiedenen Jahren verwendet werden.

Eine derartige Substitution wird am Beispiel von zwei Bildern aus dem ersten multivariaten Datensatz (Landsat-MSS, 1982) durchgeführt. Die bewölkten und fehlenden Bildteile in der Aufnahme vom 29. Juli 1982 werden durch die entsprechenden Teile aus dem Bild von 11. Juli 1982 substituiert.

Am 29. Juli 1982 war die Schneebedeckung sehr gering (Maximum in Zone E: 27%); nur noch entlang von Kreten war Schnee vorhanden. Genau an diesen Stellen verdeckten eine relativ kleine Anzahl von Wolken die Erdoberfläche. Das Bild vom 11. Juli 1982 weist keine Bewölkung auf und hat praktisch dieselbe Schneebedeckung (7% verglichen mit 5% am 29. Juli 1982). Die bewölkten Bildteile (10.9%) können daher vollständig durch die Bildteile vom 11. Juli 1982 substituiert werden.

In beiden Bildern wurden Daten derselben Regionen nicht aufgenommen (3.5 % Datenausfall). Die Schneebedeckung kann in diesen Gebieten also nicht substituiert, sondern muss in einem separaten Schritt durch Extrapolation ermittelt werden.

Tab. 9 gibt einen Ueberblick über die relativen Schneebedeckungen für das Gebiet Rhein-Felsberg in den Jahren 1982 und 1985, wie sie aus MSS- (a) und AVHRR-Daten (b) hergeleitet worden sind. Die Zusammenstellung zeigt auch den Anteil bewölkter Gebiete bzw. Regionen mit nicht vorhandenen Daten, für welche die Schneebedeckung mittels Extrapolation oder Substitution rekonstruiert wurde.

6.9. Genauigkeit der Schneekartierungen

6.9.1. Bodenkontrolle

Zur stichprobenweisen Kontrolle der Klassifikationsresultate stehen für einige Aufnahmedaten während der Anfangsphase der Schneeflächenevaluationen Luftbilder zur Verfügung. Der Interpret lernt auf diese Weise die "multi-spektralen" Farbtöne zu verstehen, so dass zu einem späteren Zeitpunkt auf

Tab. 9 : Relative Schneebedeckung [%] in fünf Höhenzonen und Bewölkungsgrad [%] (Rhein-Felsberg, 1982 und 1985)

a) Landsat-MSS-Daten:

Datum	Zone A	Zone B	Zone C	Zone D	Zone E	total Schnee/Wolken
25-MAR-82	19.7	43.8	72.5	95.5	95.7	74.9 / 20.2
18-MAI-82	0.4	6.0	48.4	91.8	96.4	59.6 / 28.2
05-JUN-82	0.2	1.0	13.5	69.5	90.8	40.6 / 23.0
11-JUL-82	0.0	0.0	0.3	8.1	35.4	7.7 / 4.3
29-JUL-82	0.0	0.0	0.1	4.3	27.2	5.2 / 14.4
29-MAR-85	24.2	68.4	85.4	98.2	98.2	84.0 / 0.0
16-MAI-85	0.0	1.6	48.3	95.6	98.5	60.4 / 9.2
24-MAI-85	0.0	0.2	28.4	89.2	97.6	52.4 / 7.2
01-JUN-85	0.0	0.0	10.8	76.9	91.8	42.4 / 6.7
09-JUN-85	0.0	0.4	6.9	77.8	94.3	42.1 / 14.6
03-JUL-85	0.0	0.0	0.4	32.1	75.8	21.6 / 0.0

b) NOAA/AVHRR-Daten:

Datum	Zone A	Zone B	Zone C	Zone D	Zone E	total
24-MAR-82	10.6	33.1	82.8	99.7	99.9	76.0
28-APR-82	9.3	27.5	78.1	98.7	100.0	73.3
12-MAI-82	0.0	6.2	50.9	89.6	97.6	59.8
29-MAR-85	29.0	64.8	92.8	99.6	100.0	85.7
18-APR-85	9.1	34.1	86.3	99.4	100.0	77.0
15-MAI-85	7.6	12.1	53.9	85.3	95.8	58.6
03-JUN-85	0.0	0.0	23.4	60.9	78.5	37.9

den Einsatz von Luftbildern verzichtet werden kann. Werden die Satellitendaten in der Hydrologie für Abflussprognosen eingesetzt, dann müssen sie in sehr kurzer Zeit ausgewertet sein. Zeitaufwendige Kontrollen anhand von parallel durchgeführten Luftbildbefliegungen oder gar Feldbegehungen sind dann nicht mehr möglich (SEIDEL et al., 1983). Nach der Erprobung der Auswertungsverfahren basiert bei der operationellen Auswertung die Genauigkeit dann auf dem empirischen Wissen und der Geschicklichkeit des Interpreten. Es ist nicht Aufgabe der vorliegenden Arbeit, eine quantitative Ableitung der Klassifikationsgenauigkeit zu liefern. Das interaktive Bildverarbeitungssystem erlaubt vielmehr eine rasche Entscheidung über die Akzeptanz der Resultate. Dies ermöglicht gemäss Zielsetzung die speditive Auswertung einer Reihe von Aufnahmen.

Eine Hilfe bei der Kontrolle bietet die visuelle Ueberprüfung von klassifiziertem Bild und Originalsatellitenbild auf dem Bildverarbeitungssystem. Ein erfahrener Interpret kann sehr rasch entscheiden, ob eine Klassifikation akzeptiert werden kann oder verworfen werden muss.

Eine in jedem Fall pixelgenaue Klassifikation kann in einem grösseren Einzugsgebiet nicht erwartet werden, d.h. es müssen gewisse Abweichungen in Kauf genommen werden. Bei der Bearbeitung grösserer Regionen sind Fehlklassifikationen, bedingt durch atmosphärische Unterschiede innerhalb der Region, nicht zu vermeiden. In Hinsicht auf Abflusssimulationen in grossen Einzugsgebieten spielen derartige kleine Fehler jedoch eine untergeordnete Rolle.

Die Erfahrung hat gezeigt, dass für routinemässige Schneeflächenbestimmungen eine bestimmte Wissensbasis notwendig ist: Für die Erhebung von Passpunkten und Stichproben sowie für die Genauigkeitskontrolle sind gute Kenntnisse des Geländes (durch Feldbegehungen), grossmassstäbiger Karten und Luftbilder, der physikalischen Eigenschaften von Schnee und von Schmelzprozessen erforderlich. Nur mit diesen Kenntnissen ist es möglich, am digitalen Bildverarbeitungssystem präzise Schneeflächenbestimmungen durchzuführen. Im Hinblick auf einen operationellen Einsatz kann auf Bodenkontrollen erst verzichtet werden, wenn diese Wissensbasis beim Interpreten vorhanden ist.

6.9.2. Auflösungsvermögen und Klassifikationsgenauigkeit

Bei der Verwendung von gröber auflösenden Sensorsystemen zur Schneekartierung, wie z.B. NOAA/AVHRR-Daten, müssen die Auswirkungen des räumlichen Auflösungsvermögens auf die Genauigkeit der Schneekartierung genauer untersucht werden.

Eine bekannte Tatsache ist, dass mit grob auflösenden Sensorsystemen fein detaillierte Objekte an der Erdoberfläche nicht mehr erkannt werden und sehr helle Objekte die umliegenden Pixel überstrahlen können. Der Sensor registriert eine Mischung von zwei oder mehreren Objekten.

Um den Einfluss der räumlichen Auflösung auf ein Klassifikationsresultat zu erklären, werden im folgenden, ausgehend vom Landsat-MSS-Datensatz mit einer Basisgittergrösse von 100m x 100m, gröbere Pixelgrössen simuliert (Tab. 10). Der Vergleich wird für fünf verschiedene Landsat-MSS-Auswertungen durchgeführt, die verschiedene Schneebedeckungszustände während der Ausaperungsperiode 1982 repräsentieren. Deutlich kann der Trend festgestellt werden, dass bei zunehmender Pixelgrösse die Anzahl Pixel kleiner Kategorien (z.B.

Tab. 10: Relative Bedeckung [%] der Schneeflächen, Uebergangszonen und aperen Flächen für fünf ausgewertete Bilder bei verschiedenen simulierten Auflösungsvermögen (1982)

Auflösung	Kategorie	25-MAR	18-MAI	5-JUN	11-JUL	29-JUL
100m x 100m	Schneefläche	64%	52%	37%	4%	2%
	Uebergangszone	16	12	14	7	5
	Aperen Flächen	20	36	49	89	93
200m x 200m	Schneefläche	61	51	35	3	3
	Uebergangszone	17	11	13	6	4
	Aperen Flächen	22	38	2	91	93
500m x 500m	Schneefläche	68	55	41	3	3
	Uebergangszone	10	8	9	5	3
	Aperen Flächen	22	36	50	92	94
1000m x 1000m	Schneeflächen	69	59	42	2	1
	Uebergangszone	6	5	6	4	1
	Aperen Flächen	25	36	52	94	98
2500m x 2500m	Schneeflächen	72	65	40	1	0
	Uebergangszone	2	2	2	1	0
	Aperen Flächen	26	33	58	98	100

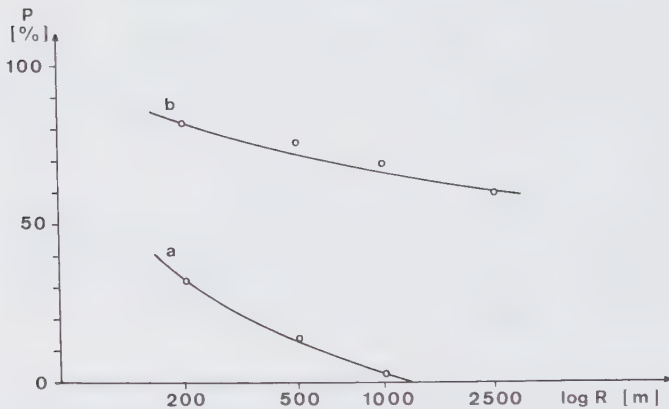


Abb. 20: Relative Anzahl reiner Schneepixel (P) in Funktion der räumlichen Auflösung (R)
a) für eine geringe Schneebedeckung ($\sim 20\%$)
b) für eine hohe Schneebedeckung ($\sim 90\%$)

"Uebergangszone" oder "schneebedeckt" am 5. Jun 1982) abnimmt oder sogar auf Null absinkt. Wenn man sich auf den Vergleich der 100m- und der 1000m-Rastergrösse konzentriert, kann festgestellt werden, dass der Betrag der Uebergangszone so klein wird, dass es unmöglich wird, eine für die statistische Auswertung vernünftige Anzahl Trainingsstichproben zu bestimmen. Ueberdies kann daraus abgeleitet werden, dass geringe Schneebedeckungen, z.B. $< 20\%$, bei der Verwendung der 1000m-Auflösung ungenauer gemessen werden. Bezüglich der Verwendung von AVHRR-Daten zur Schneekartierung ist es also gerechtfertigt, nur die zwei Kategorien "aper" und "schneebedeckt" zu verwenden.

Dasselbe Problem kann auch von einem andern Standpunkt aus betrachtet werden: Wenn wiederum die oben erwähnten Landsat-MSS-Analysen verwendet werden, kann für jede der verschiedenen simulierten Auflösungen die Anzahl reiner Pixel (keine Mixel) gezählt werden, die zur Kategorie "schneebedeckt" beizutragen. In Abb. 20 ist der prozentuale Anteil purer Schneepixel in Funktion

der räumlichen Auflösung aufgezeigt, und zwar für eine relativ geringe und eine relativ hohe Schneebedeckung. Wir können aus der Abbildung entnehmen, dass mit einer Auflösung von 1000m x 1000m bei geringer als auch bei hoher Schneebedeckung nahezu keine reinen Pixel mehr aufgenommen werden. Eine präzise Schneeklassifikation wird also besonders bei geringer Schneebedeckung stark erschwert. Dies erklärt auch die in der Praxis beobachtete Gegebenheit während der Verarbeitung der Daten.

Aus den hergeleiteten Ungenauigkeiten bei der Schneekartierung mit grob auflösenden Satellitensystemen ist zu entnehmen, dass beim Einsatz von NOAA/AVHRR-Daten Abweichungen in Kauf genommen werden müssen. Es muss deshalb abgeklärt werden, welchen Einfluss diese Differenzen auf die Abflussimulationen ausüben (Kapitel 7.).

6.10. Bestimmung der zeitlichen Veränderung der Schneedecke während der Ausaperungsperiode

In den vier bereitgestellten multivariaten Datensätzen sind die Verteilungen der Schneedecke von zwei verschiedenen Ausaperungsperioden (1982/1985), bestimmt mit unterschiedlichen Sensorsystemen (MSS/AVHRR) enthalten, ausgewertet in fünf Höhenzonen. Aus den einzelnen Werten lässt sich jetzt die zonale Abnahme der Schneefläche (Snow Cover Depletion) während einer Ausaperungsperiode, also in Funktion der Zeit, graphisch als Schneebedeckungskurve darstellen.

Die Formen dieser Kurven sind abhängig von Höhenzonen und Klimaregionen und werden durch die vorgängige Schneeakkumulation und die wechselnden Schmelzraten bestimmt. Die Schmelzraten wiederum hängen vom Temperaturgang und intermittierenden Neuschneefällen während der Ausaperungsperiode ab.

Ein langes Intervall zwischen zwei Auswertungen erhöht die Unsicherheit und das Fehlerrisiko des Kurvenverlaufs, was fehlerhafte Schneeflächenbestimmungen zur Folge hat.

Die Schneebedeckungskurven variieren auch jährlich, je nach den hydrologischen Verhältnissen. In einem Jahr mit grosser Schneebedeckung, aber mit

Temperaturen über dem Mittelwert und keinen intermittierenden Schneefällen während der Ausaperungsperiode, erfolgt die Schneeschmelze eher früh, wobei relativ viel Wasser innerhalb kurzer Zeit frei wird. In einem Jahr mit wenig Schnee, jedoch mit Temperaturen unter dem Mittelwert und mit Neuschneefällen, wird die Schneeschmelze stark verzögert mit eher geringen Wassermengen.

Aus den oben beschriebenen sogenannten "konventionellen Schneebedeckungskurven" sind diese Effekte nicht ersichtlich, d.h. Kurven verschiedener Jahre oder Regionen lassen sich nicht vergleichen. In Hinsicht auf künftige Abflussprognosen wurden "modifizierte Schneebedeckungskurven" (MARTINEC, 1985a) eingeführt, in denen die Zeitskala durch die akkumulierten Grad-Tage, und in einem weiteren Schritt durch die Schneeschmelztiefen, ersetzt werden (Kapitel 8.1.), so dass die Kurven direkt vergleichbar werden.

In vielen Einzugsgebieten apert die höchste Höhenzone im Sommer nicht vollständig aus; übrig bleiben Firnfelder und Gletscher. Auch in unserem Fall sinkt die Schneebedeckung in der höchsten Zone nicht auf Null ab, sondern schmilzt nur soweit ab, bis die minimale Schnee- und Eisbedeckung am 30. September (Ende des hydrologischen Jahres) erreicht wird. Diese Fläche ist bekannt und geht somit als Stützpunkt bei der Konstruktion der Schneebedeckungskurven ein. Für das Gebiet Rhein-Felsberg beträgt diese Fläche 3% des totalen Einzugsgebietes. Damit weist die höchste Höhenzone (E) am 30. September eine Schnee- und Eisbedeckung von 22% auf (Abb. 21).

Für die beiden Ausaperungsperioden 1981/1982 und 1984/1985 werden aufgrund dieser Bedingungen die Schneebedeckungskurven gezeichnet, wie es im folgenden noch ausführlicher beschrieben wird.

6.10.1. Ableiten der Schneebedeckungskurven für 1982 und 1985

Für das Jahr 1982 erfolgt die Herleitung der Schneebedeckungskurven aufgrund von MSS- und AVHRR-Schneeflächenauswertungen getrennt (Abb. 21). Die Kurven repräsentieren die relative Schneebedeckung im Verlauf der Ausaperungsperiode für die fünf definierten Höhenzonen (A...E). Aus der Graphik lässt sich durch einen Vergleich der Kurven ein Eindruck von der Uebereinstimmung bzw. den Abweichungen von MSS- und AVHRR-Auswertungen gewinnen.

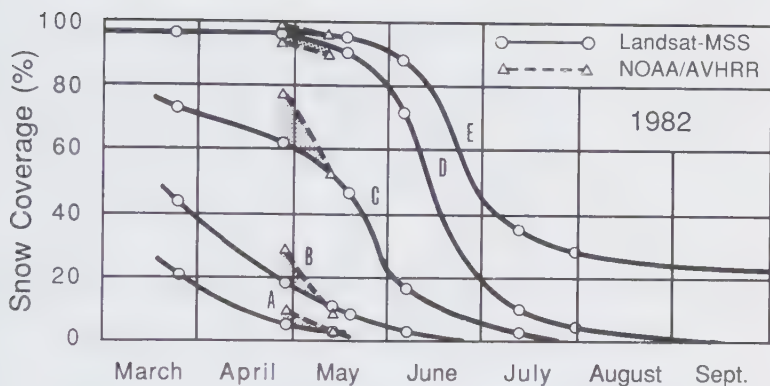


Abb. 21: Schneebedeckungskurven (1982) für fünf Höhenzonen (A..E) basierend auf MSS- und AVHRR-Auswertungen (Rhein-Felsberg)

In stark coupiertem Gelände, wie im Einzugsgebietes Rhein-Felsberg, wird nie eine Schneebedeckung von 100% erreicht. Eine Bedeckung von 90% heisst nicht etwa, dass 90% der Fläche oberhalb der Schneegrenze liegen, sondern dass steile Felsen, Felswände und Lawinenanrisse (Frühjahr) vornehmlich in den oberen Höhenbereichen nicht schneebedeckt sind. Der höher auflösende MSS-Sensor bildet derartige Bildelemente im Gegensatz zum AVHRR-System ab. Die Schneebedeckungswerte (Tab. 9) zeigen dies deutlich.

Die Herleitung der Schneebedeckungskurven aufgrund von MSS-Auswertungen für das Jahr 1985 (Abb. 22) erfolgt auf dieselbe Weise wie für das Jahr 1982. Die Bedingungen für periodische Schneekartierungen sind für dieses Jahr besser, stehen doch sechs MSS- und vier AVHRR-Datensätze für die Auswertung zur Verfügung. Bei den Schneeauswertungen mit MSS-Daten vom 6. Juni 1982 sind für die Zunahme der Schneebedeckung wiederum Neuschneefälle verantwortlich, wie aus den Berichten der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt (SMA, 1985) hervorgeht, so dass dieses Datum für die weiteren Auswertungen nicht mehr berücksichtigt wird.

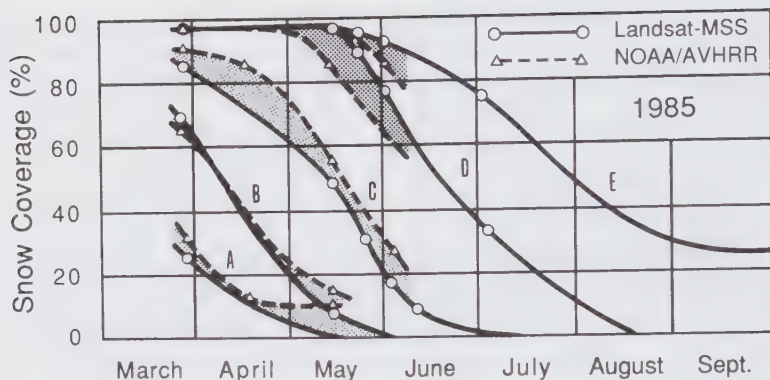


Abb. 22: Schneebedeckungskurven (1985) für fünf Höhenzonen (A..E) basierend auf MSS- und AVHRR-Auswertungen (Rhein-Felsberg)

Bei einem Vergleich zwischen den Schneebedeckungen der AVHRR-Auswertungen mit den entsprechenden Werten aus den MSS-Evaluationen treten gewisse Abweichungen auf. Sie müssen toleriert werden, da bei der gröberen Auflösung von AVHRR-Daten keine Übereinstimmung erwartet werden kann.

Ein weiterer Grund für die Abweichungen zwischen MSS- und AVHRR-Evaluationen scheint die im vorliegenden Fall relativ geringe Anzahl AVHRR-Pixel pro Zone zu sein: Wenn nicht eine minimale, auszuwertende Fläche vorhanden ist, dann müssen gewisse Abweichungen in Kauf genommen werden. Gerade die unteren beiden (A, B) und die oberste Höhenstufe (E) sind flächenmässig signifikant untervertreten. Zu dieser allzu geringen Anzahl Pixel kommt deren Verteilung hinzu: Bedingt durch das Relief, erscheinen die einzelnen Zonen als schmale Bänder. In steilem Gelände kann diese "Bandbreite" so eng werden, dass eine sinnvolle Schneeeauswertung mit der Auflösung des AVHRR-Scanners nicht mehr möglich ist.

Weitere Ursache für die Abweichungen können auch Neuschneefälle kurz vor dem Satellitenüberflug sein, die eine kurzfristige Vergrösserung der Schneefläche zur Folge haben. Einzelne Schneefälle, die während der Ausaperungszeit auftreten, vergrössern die Schneedecke, zeigen generell aber keine grossen hydrologischen Effekte. Die zusätzliche Schneedecke ist meistens nur sehr dünn und bleibt dadurch nur kurze Zeit bestehen, d.h. sobald genügend Grad-Tage kumuliert sind, schmilzt der Schnee weg. Fällt der Schnee kurz vor einem Satellitenüberflug, so wird mit grosser Wahrscheinlichkeit eine zu grosse Schneefläche errechnet, die den Verlauf der tatsächlichen Schneebedeckungskurven verzerrt. In diesen Fällen bleibt nichts anderes übrig, als das betreffende Datum nicht zu berücksichtigen und die Kurven nur mit Hilfe der unverfälschten Daten zu erstellen. Solche Neuschneefälle werden von Abflussmodellen als Schneedecken-Akkumulation genügend genau berücksichtigt, so dass bei den Abflusssimulationen dadurch keine Verfälschungen zu erwarten sind (MARTINEC et al., 1983).

Um mit AVHRR-Daten präzisere Schneeflächen zu erhalten, muss die Zahl der Höhenzonen reduziert werden. Eine derartige Reduktion der Höhenzonen wirkt sich auf die Genauigkeit der Abflusssimulationen in zwei Richtungen aus: Durch die genaueren Schneeflächenbestimmungen wird eine präzisere Abflusssimulation ermöglicht. Andererseits werden die Modellparameter, da für jede Höhenzone getrennt behandelt, sich bei einer zu geringen Anzahl Höhenzonen negativ auf die Simulationsgüte auswirken.

Die in Kapitel 7. durchgeführten Simulationen werden zeigen:

- inwieweit sich die Abweichungen zwischen den auf MSS- und AVHRR-Auswertungen beruhenden Schneebedeckungen auf die Simulationsgüte auswirken
- wann sich der Einfluss der Modellparameter durch die Reduktion der Anzahl Höhenzonen in den Simulationsresultaten negativ bemerkbar macht
- wieviele Höhenzonen für welches Sensorsystem einzusetzen sind, um gute Simulationsergebnisse zu erzielen

7. SCHNEESCHMELZ-ABFLUSSSIMULATIONEN

Nachdem die Schneebedeckungen pro Höhenzone und pro Ausaperungsperiode bereitstehen, müssen noch die andern hydrologischen Modellinputdaten bereitgestellt werden. Anschliessend werden mit dem SRM (Kapitel 4.3.) verschiedene Simulationen des Abflusses aufgezeigt und dabei auftretende Probleme besprochen.

7.1. Modellinput für 1982 und 1985

Zu den einzelnen Eingabewerten seien in der Folge einige wichtige Hinweise gegeben, die bei der Erhebung oder Bestimmung dieser Daten wichtig sind. Eine vollständige Zusammenstellung aller Inputvariablen und -parameter sowie Modelloptionen ist im Anhang II-IV zu finden.

7.1.1. Modellvariablen

Temperatur- und Niederschlagsdaten: Innerhalb des Einzugsgebietes Rheinfelsberg sind mehrere meteorologische Stationen gelegen. Ein Teil davon ist mit automatischen Messgeräten ausgerüstet, deren Daten auf einem zentralen Rechner gespeichert werden, wodurch der Zugriff zu diesen Daten erleichtert wird. Einzige Schwierigkeit besteht darin, dass die Daten zur Zeit erst ca. zwei Jahre nach der Erhebung zugänglich werden (Datenaufbereitung). Bei einem operationellen Einsatz muss für dieses Problem dringend eine Lösung gefunden werden. Um die klimatischen Variationen des Einzugsgebietes zu berücksichtigen und um repräsentative Daten bezüglich Höhe, Niederschlag und Temperatur in dieser relativ grossen Region zu erhalten, werden zur Abflusssimulation synthetische Stationen (SYN82 bzw. SYN82T und SYN85) aufgrund von sieben Messstationen berechnet (Kapitel 5.4.).

Schneedecke: Die aus den Schneebedeckungskurven hergeleiteten täglichen Flächenangaben über die Schneedecke stellen die Hauptinputvariable für das SRM dar. Sie können manuell für jede Zone aus den Graphiken abgelesen und in ein

Dateninputfile abgelegt werden. Die täglichen Werte können auch durch Digitalisieren der Kurven erhalten werden, wobei die Inkrementierung einem täglichen Intervall entsprechen muss.

Aktueller Abfluss: Die bei der Station Felsberg gemessenen Abflussdaten werden den hydrologischen Jahrbüchern der entsprechenden Jahre (HYDROLOGISCHES JAHRBUCH, 1982 und 1985) entnommen. Diese Daten sind für eine Simulation des Abflusses nicht notwendig, werden jedoch zur Genauigkeitsabschätzung (Vergleich: Simulierter - gemessener Abfluss) beigezogen.

7.1.2. Modellparameter

Tab. 11 zeigt die wichtigsten Modellparameter, die für die Abflussimulationen basierend auf fünf Höhenzonen verwendet werden.³ In der Folge wird nur auf Parameter eingegangen, deren Bestimmung spezielle Schwierigkeiten boten.

Der Rezessionskoeffizient (k) kann nicht auf die übliche Art durch Vergleichen des Abflusses von Tag n und Tag (n+1) bestimmt werden, da der Abfluss bei Felsberg durch die Wasserkraftwerke beeinflusst wird (Kapitel 5.6.) und somit nicht dem natürlichen Abfluss entspricht. Zur Bestimmung von k wird von den bekannten Daten des Dischmas auf das Gebiet Rhein-Felsberg geschlossen (Kapitel 4.3.2.). Folgender Wert konnte berechnet werden:

$$\text{Rezessionskoeffizient (k)} = 1,07 Q^{-0,029}$$

Die Flächen und mittleren, hypsometrischen Zonenhöhen sind in Tab. 12 dargestellt.

3. Diese Daten wurden von J. MARTINEC (EISLF) für das Testgebiet Rhein-Felsberg berechnet und zur weiteren Verwendung zur Verfügung gestellt

Tab. 11: Modellparameter zur Simulation des Abflusses, basierend auf fünf Höhenzonen

Abflusskoeffizienten für Schneeschmelze (c_S):						
Zonen A, B:	1.April – 30.April		$c_S = 0.8$			
	1.Mai – 30.September		$c_S = 0.7$			
Zonen C, D, E:	1.April – 15.Mai		$c_S = 0.9$			
	16.Mai – 30.September		$c_S = 0.8$			
Abflusskoeffizienten für Regenfall (c_R):						
Zonen A, B:	1.April – 30.April		$c_R = 0.9$			
	1.Mai – 30.September		$c_R = 0.6$			
Zonen C, D, E:	1.April – 15.Juni		$c_R = 0.9$			
	16.Juni – 30.September		$c_R = 0.6$			
Grad-Tag Faktoren (α) [$\text{cm } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ d}^{-1}$]:						
	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.
Zonen A, B:	0.45	0.50	0.55	0.55	0.55	0.55
Zonen C, D, E:	0.40	0.45	0.50	0.55	0.55	0.60
Temperaturgradient (δ):				0.65°C pro 100m		
Zeitverschiebung (L):				18 Stunden		
Kritische Temperatur (T_{krit}):						
1.April – 15.Juni			$T_{\text{krit}} = +3.00^\circ\text{C}$			
Zone A, B: April: Abfluss durch Regen nur von aperer Fläche. Mai-Sept.: Abfluss durch Regen von totaler Fläche.						
Zone C, D, E: 1.April-15.Juni: Abfluss durch Regen nur von aperer Fläche. 16.Juni-30.Sept.: Abfluss durch Regen von totaler Fläche						
16. Juni – 30. Juni			$T_{\text{krit}} = +2.00^\circ\text{C}$			
1. Juli – 30. September			$T_{\text{krit}} = +0.75^\circ\text{C}$			

Tab. 12: Flächen (A_F) [km^2] und mittlere Höhen ($\bar{h}$) [m ü.M.] pro Höhenzone und Teilgebiet

Höhenzone	Felsberg		Vorderrhein/Ilanz		Hinterrhein		Landwasser/Tiefencastel	
	A_F	$\bar{h}$	A_F	$\bar{h}$	A_F	$\bar{h}$	A_F	$\bar{h}$
A	262.2	900	125.5	940	15.4	1000	121.3	820
B	523.5	1400	276.7	1400	51.5	1440	195.3	1410
C	891.6	1880	410.7	1880	157.8	1910	323.1	1900
D	1160.0	2360	492.9	2360	266.7	2360	400.6	2360
E	435.2	2750	180.6	2750	114.0	2750	140.6	2750

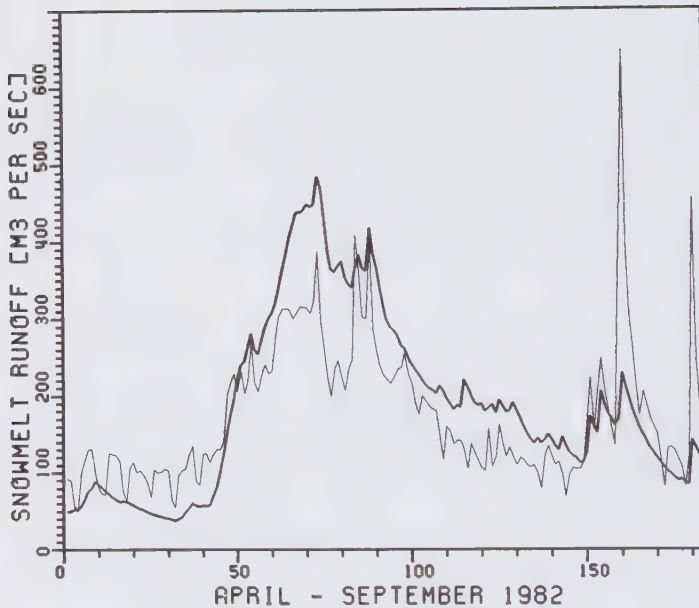


Abb. 23: Abflusssimulation 1982 (fett) im Vergleich mit dem gemessenen Abfluss (mager); Rhein-Felsberg

7.2. Abflusssimulation 1982

Die Simulationen für die Ausaperungsperiode 1982 beruhen auf Schneeflächenbestimmungen mit Landsat-MSS-Daten und der synthetischen Station SYN82. Auf die Simulationen mit NOAA/AVHRR-Evaluationen wird für die Ausaperungsperiode 1982 verzichtet, da für eine angemessene Herleitung der Schneebedeckungskurven zu wenig Aufnahmen zur Verfügung stehen.

Abb. 23 zeigt die Simulation für 1982 basierend auf MSS-Auswertungen, verglichen mit dem gemessenen Abfluss in Felsberg. Die Abweichungen sind während der ganzen Ausaperung gut auszumachen. Sie werden hauptsächlich durch

die Manipulation der Wasserkraftwerke verursacht, was deutlich in den wöchentlichen und saisonalen Schwankungen zu erkennen ist. Besonders im Frühjahr sind die gemessenen Werte höher. Dies ist bedingt durch die künstliche Erhöhung der Abflussmengen im Frühjahr infolge erhöhten Elektrizitätskonsums. Im Sommer andererseits ist der Stromverbrauch niedriger, so dass Wasser gespeichert werden kann. Der Abfluss fällt dadurch im Sommer geringer aus als erwartet.

Zu erwähnen sind auch zwei markant zu niedrig simulierte Werte im September: Zwei Starkregen, wie sie typisch sind für diese Jahreszeit (Gewitter), werden vom Modell zuwenig gut erfasst. Möglicher Verursacher könnten die synthetischen meteorologischen Daten sein, da alle Temperatur- und Niederschlagswerte durch Mittelung entstanden sind. Dadurch kann eine Reduktion von Maximalwerten (z.B. Niederschlagsspitzen) begründet werden.

Trotz diesen markanten Schwankungen kann das totale Abflussvolumen mit guter Genauigkeit simuliert werden ($\Delta Q=6.5\%$; Tab. 13). Es ist richtig, dass ein zu hohes Abflussvolumen simuliert wird, da unter schweizerisch-alpinen Verhältnissen im Sommer Wasser gespeichert wird.

Ein Kurvenvergleich mit Hilfe des Nash-Sutcliffe-Gütekriterium (R^2 ; Kapitel 4.3.4.) fällt wegen der erwähnten Abweichungen unbefriedigend aus.

Tab. 13: Resultate der verschiedenen Abflusssimulationen (1982)

Periode	Abflussvolumen [m ³]	Volumendifferenz [%]	R ²
April-September 1982	gemessen: 2779·10 ⁶		
	simuliert: 2960·10 ⁶	6.5	0.25
April-September 1982	natürlich *): 3162·10 ⁶		
	simuliert: 2960·10 ⁶	- 6.4	0.64
April-August 1982	natürlich *): 2605·10 ⁶		
	simuliert: 2592·10 ⁶	- 0.5	0.82
April-September 1982	natürlich *): 3162·10 ⁶		
	summiert **): 2955·10 ⁶	- 6.5	-. -

*) Rekonstruierter, natürlicher Abfluss

**) Summe des Abflusses aus Teilgebieten (Kapitel 7.3.)

Die Abweichung von 6.5% könnte durch ein Anpassen der Parameter (z.B. des Abflusskoeffizienten) reduziert werden. Ausser unter extrem schwierigen Bedingungen sollten solche Angleichungen jedoch vermieden werden, da sie dem deterministischen Charakter des Modells widersprechen.

Wie in Kapitel 5.6. ausgeführt, wurde aufgrund der täglichen Zu- und Abflussdaten von den Kraftwerkgesellschaften der natürliche Abfluss bestmöglich rekonstruiert. Abb. 24 zeigt den natürlichen (rekonstruierten) Abfluss bei Felsberg, verglichen mit derselben Simulation wie eben besprochen (basierend auf der synthetischen Station SYN82), d.h. ohne irgendwelche Parameter zu verändern. Die meisten täglichen und wöchentlichen Abweichungen sind durch diese Korrektur verschwunden, was sich in einem Anstieg des R^2 -Wertes auf 0.64 auswirkt (Tab. 13). Der simulierte Abfluss ist nun 6.4% kleiner als der natürliche Abfluss. Nicht eliminiert werden können die Abweichungen, die durch die beiden Starkregen verursacht werden.

Es stellt sich nun die Frage, ob der Abflusskoeffizient (oder auch andere Parameter) nicht doch angepasst werden sollte. Auch jetzt muss wieder eine negative Antwort gegeben werden. Das Defizit erscheint hauptsächlich am Ende der Schneeschmelzperiode, verursacht durch die zwei Niederschlagsspitzen im September. Bessere Niederschlagsdaten würden folglich primär helfen, die Abflussimulation zu verbessern. Durch die Einschränkung der Simulation auf die eigentliche Ausaperungsperiode April bis August entstehen befriedigende Resultate, steigt doch der R^2 -Wertes auf 0.82 und die volumenmässige Differenz zwischen simuliertem und natürlichem Abfluss sinkt auf 0.5% (Tab. 13).

Werden die Simulationsergebnisse aufgrund der Schneeverhältnissen im Frühjahr 1982 interpretiert, so kann festgehalten werden, dass die Simulationen den tatsächlichen Gegebenheiten weitgehend entsprechen. Ein Kaltlufteinbruch am 11. April 1982 verzögerte den üblichen Beginn der Schneeschmelze um fast einen Monat. Am 12. Mai 1982 begann eine einmonatige Wärmeperiode, welche die Hauptschneeschmelze auslöste (Abb. 24). Trotz der grossen Schneemengen aperten die meisten Gebiete mit nur fünf bis zehn Tagen Verspätung gegenüber dem langjährigen Mittel aus.

Die Simulation 1982 wird auch aufgrund der Messdaten einer einzigen meteorologischen Station (Disentis) durchgeführt, die ungefähr die mittleren klima-

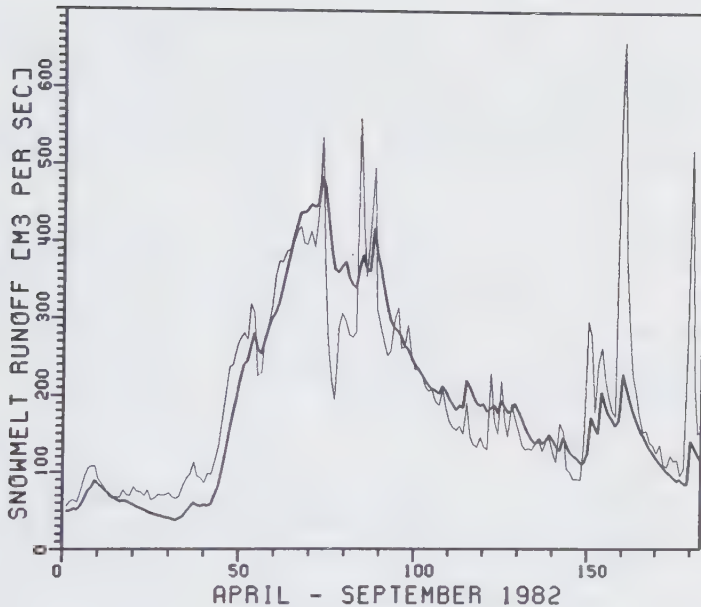


Abb. 24: Abflusssimulation 1982 (fett) im Vergleich mit dem natürlichen, rekonstruierten Abfluss (mager); Rhein-Felsberg

tischen Bedingungen des Gebietes Rhein-Felsberg repräsentiert. Die Resultate zeigen eine erstaunliche Übereinstimmung mit denjenigen, die aus der Simulation mit der synthetischen Station (SYN82) resultieren. Falls mit Simulationen basierend auf den Daten von Disentis in weiteren Jahren ebenfalls solche Ergebnisse erzielt werden, könnte anstelle einer aufwendig zu berechnenden synthetischen Station diese einzelne eingesetzt werden. Da jedoch aus früheren Jahren keine Simulationen vorhanden sind, kann die langjährige Übereinstimmung noch nicht bestätigt werden.

7.3. Simulationsvergleiche in Teilgebieten (1982)

Durch die innerhalb des Gebietes Rhein-Felsberg herrschenden unterschiedlichen klimatischen Bedingungen wird eine differenzierte Schneeverteilung verursacht. Mit Schneeauswertungen und Abflussimulationen in Teilgebieten soll untersucht werden, ob die klimatischen Bedingungen durch die im Einzugsgebiet verwendeten meteorologischen Stationen genügend gut wiedergegeben werden.

Die Unterteilung des Gebietes erfolgt in drei Regionen: Vorderrhein/Ilanz, Hinterrhein, Landwasser/Tiefencastel. Diese Gliederung wurde bereits bei der Generierung der digitalen Gebietsmaske (Kapitel 6.4.5.3.) berücksichtigt, so dass die Berechnung der zonalen Schneebedeckungen pro Teilgebiet ohne Schwierigkeiten durchgeführt werden kann.

Die Schneeflächenbestimmungen in den Teilgebieten werden wiederum für das Jahr 1982 vorgenommen. Durch die Unterteilung in kleinere Regionen müssen die Messungen möglichst präzise durchgeführt werden. Da auch in den Teilgebieten mit fünf Höhenzonen gearbeitet wird und um der Bedingung einer minimalen Grösse der auszuwertenden Fläche zu genügen, kommt das Miteinbeziehen von AVHRR-Daten für Schneeflächenbestimmungen nicht in Frage. Die Anzahl Pixel pro Höhenstufe und Teilgebiet würde viel zu gering ausgefallen, so dass eine statistische Auswertung kaum mehr sinnvoll wäre. Die Schneebedeckungen für die betreffenden Teilgebiete sind in Tab. 14 aufgeführt.

Aus den Schneebedeckungswerten werden für die einzelnen Teilgebiete die Schneebedeckungskurven hergeleitet (Abb. 25). Als letzter Stützpunkt in der obersten Zone (E) dient wiederum die minimale Schneebedeckung am Ende des hydrologischen Jahres. Sie beträgt für die einzelnen Teilgebiete:

Vorderrhein/Ilanz: 34%

Hinterrhein: 22%

Landwasser/Tiefencastel: 8%

Tab. 14: Relative Schneebedeckung [%] in fünf Höhenzonen und Bewölkungsgrad [%] für drei Teilgebiete basierend auf MSS-Evaluationen (1982)

Datum	Zone	Vorderrhein/ Illanz Schnee/Wolken	Hinterrhein Schnee/Wolken	Landwasser/ Tiefencastel Schnee/Wolken
25-MAR-82	A	30.7	25.2	9.8
	B	47.6	29.8	42.3
	C	78.0	68.2	67.6
	D	94.5	95.7	96.4
	E	95.7	96.4	95.4
	total	76.0 / 19.8	81.2 / 51.8	70.5 / 4.6
18-MAI-82	A	0.9	0.4	0.0
	B	9.2	2.0	3.7
	C	59.6	45.6	38.2
	D	92.2	93.0	90.9
	E	97.2	97.5	95.0
	total	60.6 / 28.8	71.4 / 53.7	53.2 / 14.6
05-JUN-82	A	0.2	0.5	0.1
	B	1.0	1.4	0.9
	C	19.3	11.5	7.1
	D	76.4	66.1	64.1
	E	92.8	90.1	88.9
	total	42.1 / 25.5	49.2 / 20.5	34.4 / 21.1
11-JUL-82	A	0.0	0.0	0.0
	B	0.0	0.0	0.0
	C	0.4	0.2	0.1
	D	15.0	3.7	3.7
	E	50.9	26.6	24.9
	total	11.3 / 8.7	6.7 / 1.2	4.3 / 0.2
29-JUL-82	A	0.0	0.0	0.0
	B	0.0	0.0	0.0
	C	0.2	0.1	0.0
	D	8.6	2.1	1.2
	E	38.5	24.1	16.8
	total	7.6 / 7.9	5.4 / 0.5	2.4 / 0.6

Die Abflusssimulationen werden für die drei Teilgebiete separat durchgeführt. Für jedes Gebiet werden verschiedene meteorologische Stationen verwendet. Für die Region Vorderrhein/Illanz ist es die Station Disentis, für die Region Hinterrhein diejenige von Hinterrhein. Für das Gebiet Landwasser/Tiefencastel wird aus den Stationen Alvaneu, Davos und Weissfluhjoch eine synthetische Station (SYN82T) berechnet (Kapitel 5.4.).

Da in den einzelnen Teilgebieten keine Abflussmessstationen vorhanden sind, können die simulierten Abflüsse nicht mit den gemessenen verglichen werden. Aus diesem Grund werden die täglichen Werte aller drei Teilgebiete aufsum-

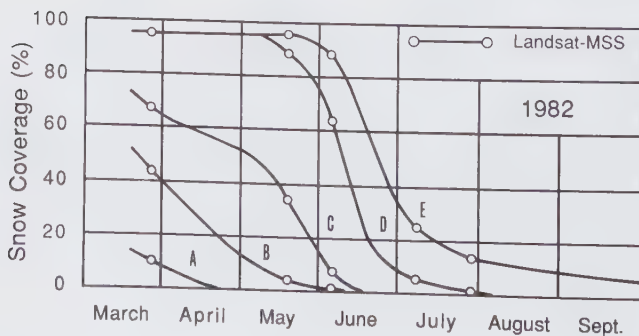
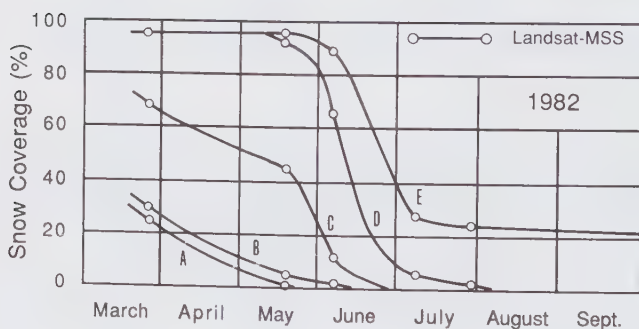
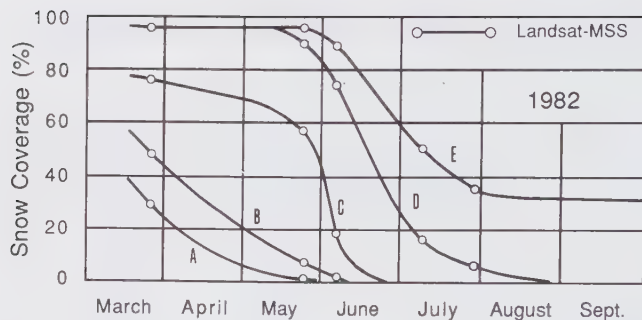


Abb. 25: Schneebedeckungskurven (1982) für die Teilgebiete Vorderrhein/Ilanz (oben), Hinterrhein (Mitte) und Landwasser/Tiefencastel (unten) und fünf Höhenzonen (A..E)

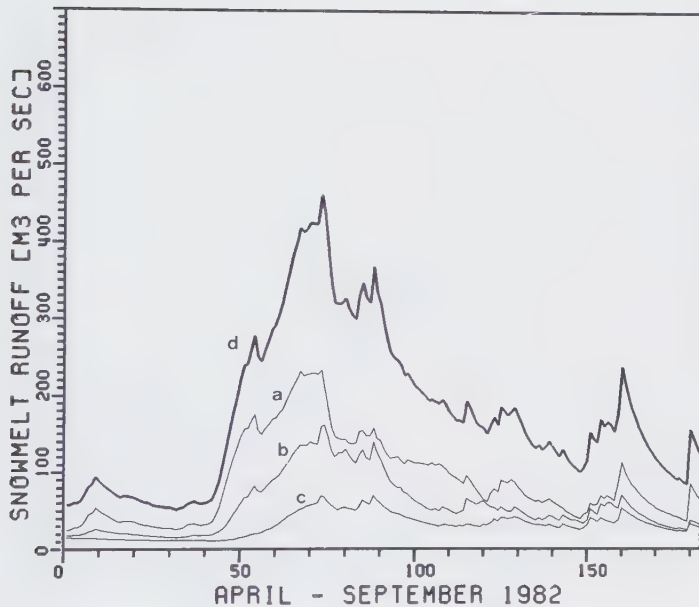


Abb. 26: Abflusssimulation in drei Teilgebieten (1982)

- | | |
|----------------------------|-------------------------|
| a) Vordererrhein/Ilanz | c) Hinterrhein |
| b) Landwasser/Tiefencastel | d) Summe von a, b und c |

miert (Abb. 26) und den Felsberg-Abflussdaten gegenübergestellt.

Abb. 27 zeigt den Vergleich zwischen dieser aufsummierten Abflusskurve und der Simulation für das ganze Testgebiet (Kapitel 7.2.; Abb. 24). Die Abweichungen fallen gering aus. Die volumenmässige Differenz des Abflusses beträgt mit $\Delta Q = -6.5\%$ (Tab. 13) praktisch gleich viel wie für das gesamte Gebiet simuliert wurde. Trotz der recht unterschiedlichen klimatischen Bedingungen im Gebiet Rhein-Felsberg sind keine grösseren Abweichungen erkennbar. Aufgrund dieser Resultate kann angenommen werden, dass die eingangs eingeführte synthetische Station (SYN82) die klimatischen Gegebenheiten des ge-

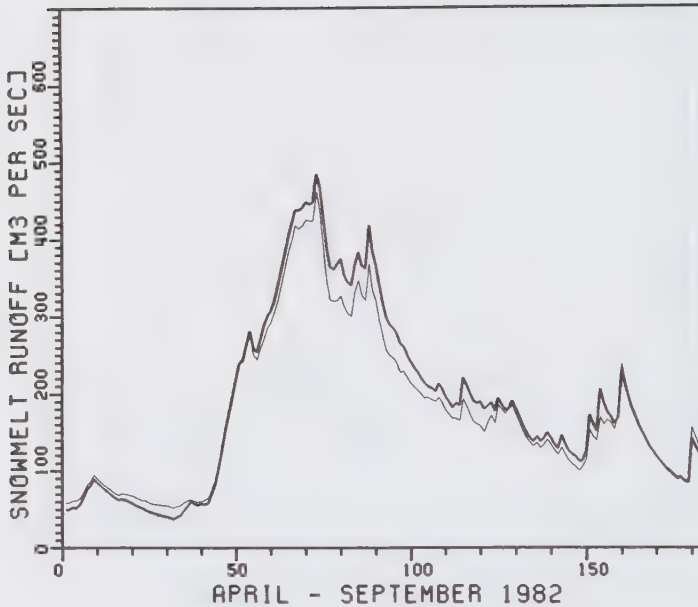


Abb. 27: Summe des simulierten Abflusses aus drei Teilgebieten (fett) verglichen mit dem simulierten Abfluss des ganzen Einzugsgebiets (mager); 1982

samen Einzugsgebiets für Schneeschmelz-Abflusssimulationen genügend gut widerspiegelt und deshalb als repräsentativ angesehen werden darf.

7.4. Abflusssimulation 1985

Abflusssimulationen werden zunächst für fünf Höhenzonen basierend auf den Landsat-MSS-Schneeflächenbestimmungen durchgeführt (Kapitel 7.4.1.). In einem weiteren Schritt werden die Simulationen mit den NOAA/AVHRR-Daten mit reduzierter Anzahl Höhenzonen vorgenommen und die beiden Ergebnisse einander gegenübergestellt (Kapitel 7.4.2.).

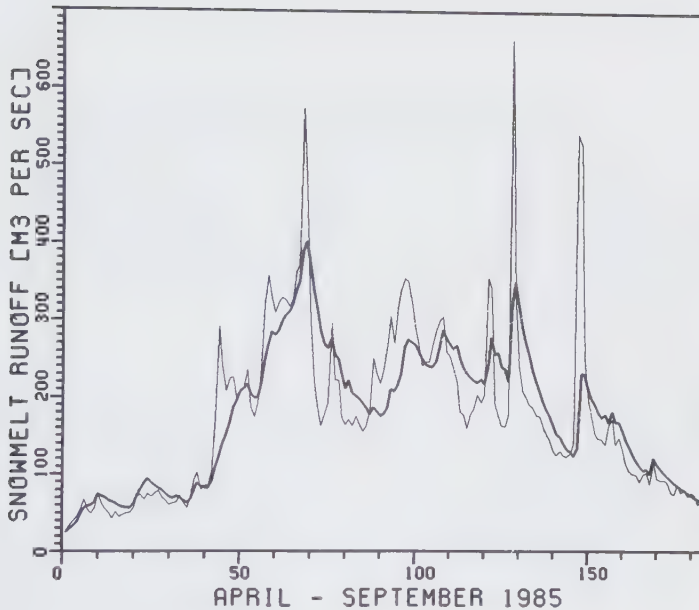


Abb. 28: Abflusssimulation 1985 basierend auf MSS-Auswertungen und fünf Höhenzonen (fett) im Vergleich mit dem natürlichen, rekonstruierten Abfluss (mager); Rhein-Felsberg

7.4.1. Simulation basierend auf MSS-Auswertungen

Für die Simulationen basierend auf auf MSS-Auswertungen wird wiederum eine synthetische meteorologische Station (SYN85) und die gleichen Inputparameter wie für das Jahr 1982 verwendet.

Abb. 28 zeigt die Abflusssimulation im Vergleich mit dem rekonstruierten, natürlichen Abfluss. Zu Beginn der Ausaperungsperiode wird zwischen simuliertem und gemessenem Abfluss eine gute Uebereinstimmung erzielt. Während der übrigen Schneeschmelze fallen die Abweichungen mässig bis gering aus. Nur gerade Spitzenabflüsse in Folge von drei Starkregen werden nicht genügend

gut simuliert. Auch hier gilt, wie für 1982, dass bessere Niederschlagsdaten genauere Resultate erbringen würden.

Deutlich sichtbar ist ebenfalls, dass die Ausaperung länger andauerte als während der Ausaperungsperiode 1982. Die maximale Schneeschmelze findet im Jahre 1982 Anfang Juni statt und nimmt dann kontinuierlich bis Ende August ab. Ganz anders sind die Verhältnisse 1985: Die maximale Schneeschmelze wird zwar ebenfalls Anfang Juni erreicht. Die Ausaperung wird aber durch einen schneereichen Frühsommer (Mai, Juni) mit markanten Kaltlufteinbrüchen verlangsamt, was sich bis in den August wiederholt. Das Abflussregime wird im Juli und August von heftigen Gewitterregen beeinflusst.

Eine weitere markante Abweichung kann festgestellt werden: Ziemlich regelmäßig, nämlich immer an einem Dienstag oder Mittwoch, treten im rekonstruierten Abfluss unerklärliche Spitzen auf. Auch nach Ueberprüfung der Abfluss-Korrekturdaten konnte kein Fehler gefunden werden, so dass vermutet werden muss, dass der Fehler bereits bei der Aufzeichnung der Daten aufgetreten ist. Diese Abweichungen sind Ursache für den relativ tiefen R^2 -Wert von 0.66 (Tab. 15). Dieser Wert darf jedoch wegen der genannten Ursachen

Tab. 15: Resultate der verschiedenen Abflusssimulationen (1985)

Periode	Abflussvolumen [m³]	Volumendifferenz [%]	R^2
April-September 1985 (a)	natürlich: 2815*10 ⁶ simuliert: 2789*10 ⁶	0.9	0.66
April-September 1985 (b)	natürlich: 2815*10 ⁶ simuliert: 2867*10 ⁶	- 1.6	0.67
April-September 1985 (c)	natürlich: 2815*10 ⁶ simuliert: 3027*10 ⁶	- 7.5	0.65
April-September 1985 (d)	natürlich: 2815*10 ⁶ simuliert: 3134*10 ⁶	-11.3	0.66
April-September 1985 (e)	natürlich: 2815*10 ⁶ simuliert: 3230*10 ⁶	-14.8	0.60
April-September 1985 (f)	natürlich: 2815*10 ⁶ simuliert: 4216*10 ⁶	-49.8	0.26

- (a) MSS-Evaluationen, fünf Höhenzonen, A/B/C/D/E
- (b) MSS-Evaluationen, drei Höhenzonen A'/B'/C'
- (c) AVHRR-Evaluationen, drei Höhenzonen A'/B'/C'
- (d) MSS-Evaluationen, zwei Höhenzonen A''/B''
- (e) AVHRR-Evaluationen, zwei Höhenzonen A''/B''
- (f) MSS-Evaluationen, eine Höhenzone A'''

nicht unterbewertet werden. Die Simulation zeigt eine volumenmässige Abweichung von nur 0.9% (Tab. 15).

7.4.2. Simulation basierend auf NOAA/AVHRR-Auswertungen

Um mit NOAA/AVHRR-Daten entsprechend präzise Schneeeauswertungen im alpinen Raum durchführen zu können, muss aus statistischen Gründen eine Fläche ausgewertet werden können, die eine minimale Grösse nicht unterschreitet. Dies kann erreicht werden, indem die Anzahl Höhenzonen reduziert wird.

Alle Modellinputdaten beziehen sich auf die einzelnen Höhenzonen. Wird die Anzahl Höhenzonen eingeschränkt, zeigt dies Auswirkungen auf die Abflussimulationen. So fallen z.B. die Extrapolation der Temperaturen von Stations- auf mittlere Zonenhöhe und die darauf basierenden Schneeschmelztiefen weniger exakt aus, weshalb mit grösseren Differenzen des Schmelzwasservolumens gerechnet werden muss.

Es gilt nun, die Auswirkungen einer Reduktion der Anzahl Höhenzonen auf die Abflussberechnungen zu bestimmen.

7.4.2.1. Simulation basierend auf drei Höhenzonen

Eine erste Reduktion erfolgt auf drei Höhenstufen. Die Gliederung dieser Höhenzonen erfolgt nicht mehr aufgrund bereits existierender Werte, sondern stützt sich auf die Werteverteilung des Höhenkanals (hypsographische Kurve; Kapitel 6.2.). Die Einteilung wird unter Voraussetzung möglichst gleicher Flächen im Summenhistogramm vorgenommen. Die Intervalle der alten und der neuen Höhenstufen sowie die zugehörigen Flächen pro Höhenzone sind aus Tab. 16 ersichtlich. Für diese drei Höhenzonen werden die Schneebedeckungen neu berechnet werden (Tab. 17).

Es werden die Schneebedeckungskurven für die drei Höhenstufen hergeleitet. Die Kurven werden für MSS- und AVHRR-Schneeflächenbestimmungen getrennt erstellt (Abb. 29).

Tab. 16: Höhenbereiche und zugehörige Flächen bei fünf respektive drei oder zwei Höhenzonen

Zone	Fläche [km ²]	Höhenbereich [m ü.M.]
A	261	560 - 1100
B	523	1100 - 1600
C	892	1600 - 2100
D	1161	2100 - 2600
E	435	2600 - 3614
A'	1087	560 - 1800
B'	1043	1800 - 2300
C'	1142	2300 - 3614
A''	1549	560 - 2050
B''	1723	2050 - 3614

Tab. 17: Relative Schneebedeckung [%] in drei Höhenzonen basierend auf Landsat-MSS- und NOAA/AVHRR-Evaluationen (Rhein-Felsberg, 1985)

Datum	Schneebedeckung				Sensor
	A'	B'	C'	total	
29-MAR-85	59.3	94.1	98.1	83.9	MSS
29-MAR-85	49.2	93.1	99.8	80.0	AVHRR
18-APR-85	23.3	89.3	99.8	69.7	AVHRR
15-MAI-85	18.1	70.9	93.3	59.8	AVHRR
16-MAI-85	4.3	77.1	98.1	60.3	MSS
24-MAI-85	0.9	59.0	95.7	52.5	MSS
01-JUN-85	0.4	35.5	89.0	42.5	MSS
03-JUN-85	6.2	42.8	79.2	41.9	AVHRR
09-JUN-85	0.4	30.4	91.7	41.8	MSS
03-JUL-85	0.0	3.6	58.3	21.5	MSS

Die Abweichungen zwischen MSS- und AVHRR-Schneebedeckungen verringern sich durch die Reduktion der Anzahl Höhenzonen, doch kann weiterhin der Trend festgestellt werden, dass mit AVHRR-Auswertungen geringe Schneebedeckungen in tieferen Zonen überschätzt, hohe Schneebedeckungen in höheren Lagen jedoch unterschätzt werden. Die Gründe für diese Abweichungen sind leicht zu finden. Erstens werden bei AVHRR-Daten am Uebergang von Schnee zu aper zu viele Mischpixel noch als Schnee klassifiziert. Zweitens werden noch mehrheitlich schneebedeckte Regionen in höheren Lagen im Frühjahr eher als schneefrei klassifiziert. Solche Mischpixel reflektieren bei reduzierter Albedo, bedingt durch Verschmutzung und Metamorphose, verhältnismässig schwach, was zu einer Unterschätzung der Schneedecke führt. Trotz der Reduktion bleiben gewisse Abweichungen in den untersten Höhenzonen (A, A')

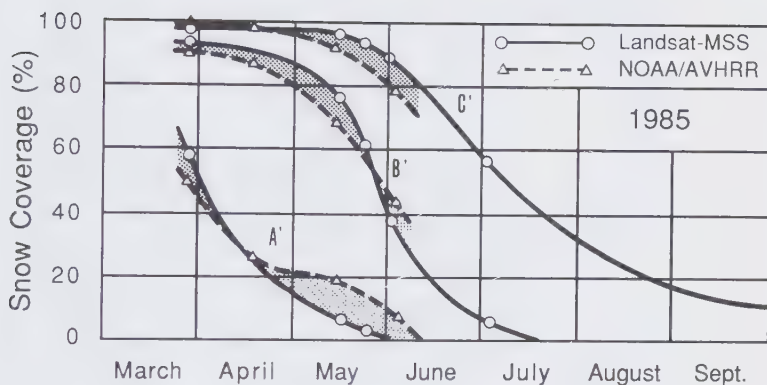


Abb. 29: Schneebedeckungskurven (1982) für drei Höhenzonen (A', B', C') basierend auf AVHRR- und MSS-Auswertungen (Rhein-Felsberg)

weiterhin bestehen.

Durch die Reduktion der Anzahl Höhenzonen ist es auch erforderlich, die Modellvariablen und einige Modellparameter neu zu bestimmen (Tab. 18). Für die Temperatur- und Niederschlagswerte wird wiederum die synthetische Station (SYN85) verwendet.

Für die Ausaperungsperiode 1985 werden zwei verschiedene Simulationen durchgeführt: Einmal beruhen sie auf AVHRR-Schneeflächenbestimmungen, das andere Mal auf MSS-Evaluationen. Für die erste Simulation sind gegen Ende der Ausaperungsperiode die Schneeflächen zu gering, um noch mit NOAA/AVHRR-Daten aufgenommen werden zu können. Es stehen deshalb nicht genügend Auswertungen zur Herleitung der Schneebedeckungskurven zur Verfügung. Sie werden nach dem letzten AVHRR-Aufnahmedatum durch diejenigen von Landsat-MSS-Evaluationen vervollständigt.

Tab. 18: Modellparameter für die Simulation des Abflusses basierend auf drei Höhenzonen

Abflusskoeffizienten für Schneeschmelze (c_S):						
Zone A':	1.April – 15.Mai	$c_S = 0.82$				
	16.Mai – 30.September	$c_S = 0.72$				
Zone B':	1.April – 15.Mai	$c_S = 0.90$				
	16.Mai – 30.September	$c_S = 0.80$				
Zone C':	1.April – 15.Mai	$c_S = 0.90$				
	15.Mai – 30.September	$c_S = 0.80$				
Abflusskoeffizienten für Regenfall (c_R):						
Zone A':	1.April – 30.April	$c_R = 0.90$				
	1.Mai – 30.September	$c_R = 0.60$				
Zone B':	1.April – 15.Mai	$c_R = 0.90$				
	16.Mai – 30.September	$c_R = 0.60$				
Zone C':	1.April – 15.Mai	$c_R = 0.90$				
	16.Mai – 30.September	$c_R = 0.60$				
Grad-Tag Faktoren (α) [$\text{cm } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ d}^{-1}$]:						
	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.
Zone A':	0.44	0.49	0.53	0.55	0.55	0.60
Zone B':	0.40	0.45	0.50	0.55	0.55	0.60
Zone C':	0.40	0.45	0.50	0.55	0.55	0.60

Die Ergebnisse der beiden Simulationen sind in Tab. 15 aufgeführt. Abb. 30 zeigt die Simulation basierend auf den AVHRR-Auswertungen, verglichen mit dem natürlichen, rekonstruierten Abfluss. Die Simulation fällt mit einer Differenz von $\Delta Q = -7.5\%$ (Tab. 15) befriedigend aus. Die Simulation zeigt grundsätzlich dieselben täglichen Abweichungen wie bei der Verwendung von fünf Höhenzonen, was sich auch in einem vergleichbaren $R^2 = 0.65$ ausdrückt. Es muss nochmals darauf hingewiesen werden, dass dieser R^2 -Wert nicht zu schlecht bewertet werden darf, da einige tägliche Abweichungen, entstanden durch die Manipulation der Kraftwerke, nicht eliminiert werden können.

Die Abweichungen werden durch die wegen des geringeren Auflösungsvermögens ungenaueren Schneekartierungen verursacht. Diese Differenzen können, solange kleiner als 10%, als befriedigend angesehen werden (mündliche Mitteilung von Herrn Dr. MARTINEC).

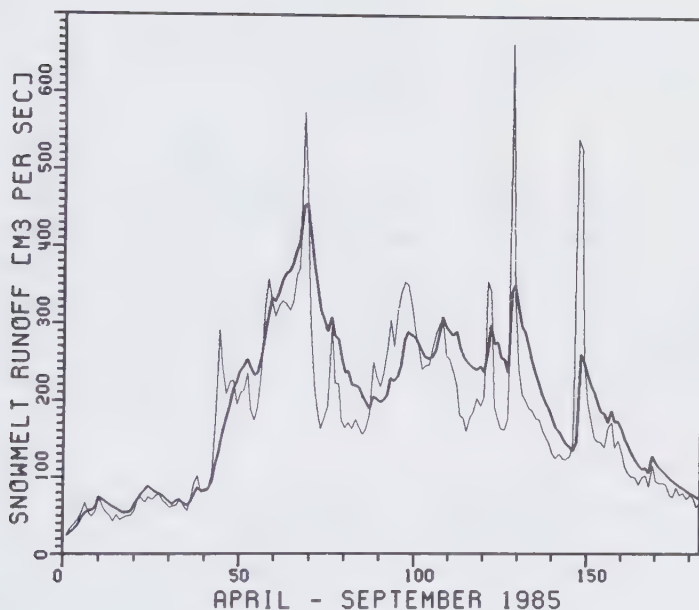


Abb. 30: Abflusssimulation 1985 basierend auf NOAA/AVHRR-Auswertungen (fett) im Vergleich mit dem natürlichen, rekonstruierten Abfluss (mager); Rhein-Felsberg

Dieses Resultat verdient besondere Beachtung, kann doch daraus geschlossen werden, dass Schneeflächenauswertungen mit AVHRR-Daten für Abflusssimulationen eingesetzt werden können, sofern für die Auswertungen eine minimale Fläche, abhängig von den topographischen Verhältnissen, vorhanden ist.

Die Simulation mit drei Höhenzonen basierend auf MSS-Schneeflächenbestimmungen fällt mit einer volumenmässigen Differenz von $\Delta Q = -1.6\%$ (Tab. 15) natürlich besser aus als bei der Simulation mit AVHRR-Auswertungen, da die

Schneeflächen und damit die Schneebedeckungskurven präziser bestimmt werden können. Trotz der Reduktion auf drei Höhenzonen werden keine grösseren Simulationsfehler hervorgerufen, was bedeutet, dass durch die Temperaturextrapolation nur sehr geringfügige Abweichungen entstanden sind.

Es empfiehlt sich jedoch, für Abflussimulationen wenn immer möglich auch MSS-Auswertungen zur Bestimmung der Schneebedeckungskurven beizuziehen (kombinierter Einsatz von MSS und AVHRR). Zumindest zu Beginn und gegen Ende der Ausaperungsperiode ist es sinnvoll, je eine MSS-Auswertung einzusetzen, damit die Schneebedeckungskurven präzise festgelegt werden können (Eichung).

7.4.2.2. Simulation basierend auf zwei Höhenzonen

Um abschätzen zu können, wann die Anzahl Höhenzonen zu gering ist, d.h. schlechte Simulationsresultate erzielt werden, wird die Anzahl Zonen auf deren zwei reduziert (Tab. 16). Wiederum werden die Schneeflächen aufgrund der multivariaten Datensätze neu bestimmt (Tab. 19) und daraus die Schneebedeckungskurven abgeleitet (Abb. 31). Für die Temperatur- und Niederschlagswerte wird weiterhin die synthetische Station (SYN85) verwendet. Durch die Neudefinition der Höhenzonen müssen auch die Modellparameter entsprechend wieder berechnet werden (Tab. 20).

Tab. 19: Relative Schneebedeckung [%] in zwei Höhenzonen basierend auf Landsat-MSS- und NOAA/AVHRR-Auswertungen (Rhein-Felsberg, 1985)

Datum	Schneebedeckung			Sensor
	A''	B''	total	
29-MAR-85	69.8	98.0	83.9	MSS
29-MAR-85	62.8	98.7	80.0	AVHRR
18-APR-85	43.1	98.7	69.7	AVHRR
15-MAI-85	33.3	88.7	59.8	AVHRR
16-MAI-85	23.4	96.2	59.8	MSS
24-MAI-85	12.9	90.9	51.9	MSS
01-JUN-85	4.7	80.2	42.5	MSS
03-JUN-85	14.8	71.5	42.0	AVHRR
03-JUL-85	0.2	42.7	22.5	MSS

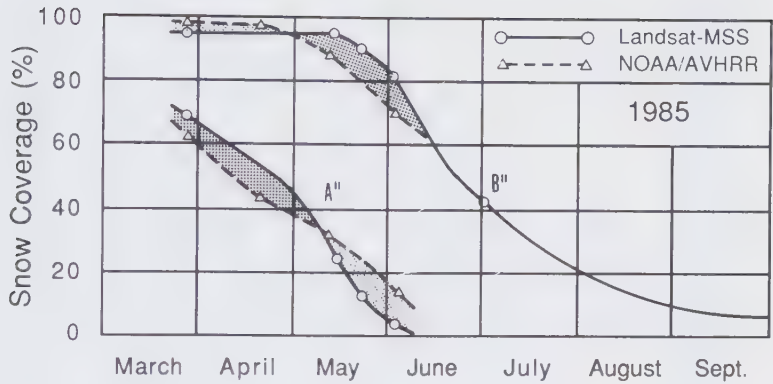
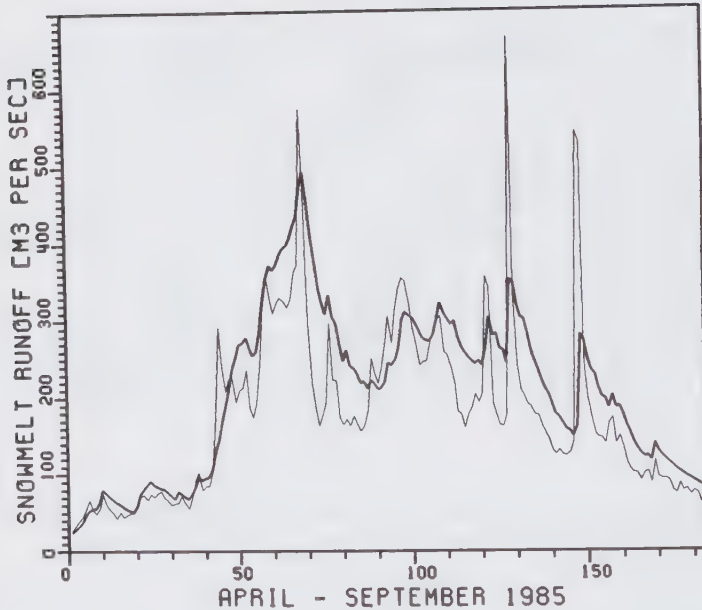


Abb. 31: Schneebedeckungskurven (1985) für zwei Höhenzonen (A'', B'') basierend auf AVHRR- und MSS-Auswertungen (Rhein-Felsberg)

Tab. 20: Modellparameter für die Simulation des Abflusses basierend auf zwei Höhenzonen

Abflusskoeffizienten für Schneeschmelze (c_S):						
Zone A'':	1.April – 15.Mai	$c_S = 0.85$				
	16.Mai – 30.September	$c_S = 0.75$				
Zone B'':	1.April – 15.Mai	$c_S = 0.90$				
	16.Mai – 30.September	$c_S = 0.80$				
Abflusskoeffizienten für Regenfall (c_R):						
Zone A'':	1.April – 30.April	$c_R = 0.90$				
	1.Mai – 15.Juni	$c_R = 0.77$				
	16.Juni – 30.September	$c_R = 0.60$				
Zone B'':	1.April – 15.Juni	$c_R = 0.90$				
	16.Juni – 30.September	$c_R = 0.60$				
Grad-Tag Faktoren (α) [$\text{cm } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ d}^{-1}$]:						
	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.
Zone A'':	0.43	0.47	0.52	0.55	0.55	0.60
Zone B'':	0.40	0.45	0.50	0.55	0.55	0.60



Abl. 32: Abflussimulation 1985 basierend auf NOAA/AVHRR-Auswertungen (fett) im Vergleich mit dem natürlichen, rekonstruierten Abfluss (mager); Rhein-Felsberg

Wiederum werden zwei Simulationen durchgeführt (Tab. 15): Die erste basierend nur auf AVHRR-Schneeflächenauswertungen, die zweite auf MSS-Auswertungen.

Bei der Reduktion auf zwei Höhenzonen fallen die volumenmässigen Differenzen bei beiden Simulationen deutlich höher aus, was auf eine zu schlechte Temperaturextrapolation hinweist. Mit der Simulation basierend auf AVHRR-Schneeflächenbestimmungen (Abb. 32) wird ein ΔQ von -14,8%, mit den MSS-Evaluierungen ein solches von -11,3% erreicht. Auffallend ist die geringere Differenz zwischen der AVHRR- und MSS-Simulation gegenüber den vorhergehenden Simulationen mit drei bzw. fünf Zonen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass mit

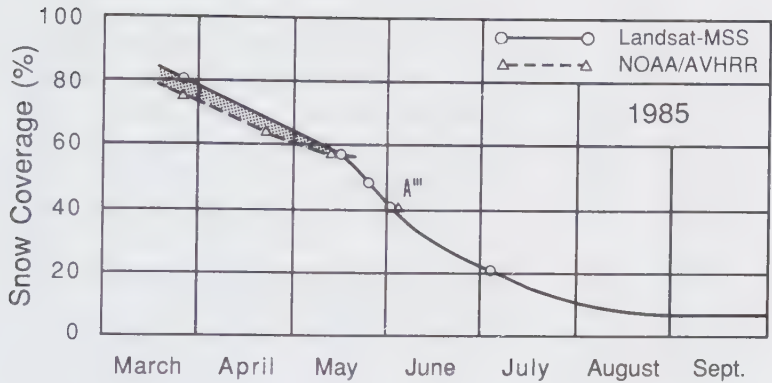


Abb. 33: Schneebedeckungskurven (1985) für eine Höhenzone basierend auf AVHRR- und MSS-Auswertungen (Rhein-Felsberg)

weniger Höhenzonen die Schneekartierungen mit AVHRR-Daten präziser ausgeführt werden können (mehr Pixel pro Zone) und somit die Unterschiede zwischen MSS- und NOAA-Auswertungen geringer werden. Auf eine Abbildung der Simulationen mit MSS-Auswertungen wird deshalb verzichtet.

Bei der Reduktion auf zwei Höhenzonen können hingegen immer noch dieselben täglichen Abweichungen wie bei den vorhergehenden Simulationen festgestellt werden ($R^2 = 0.60$ für AVHRR bzw. 0.66 für MSS; Tab. 15).

7.4.2.3. Simulation basierend auf einer Höhenzone

Wird der Abfluss aufgrund einer einzigen Höhenzone simuliert, müssen wiederum die Schneeflächen neu bestimmt und daraus die Schneebedeckungskurven hergeleitet (Abb. 33). Auffällig ist, dass die Kurven basierend auf Landsat-MSS- bzw. NOAA/AVHRR-Evaluationen praktisch identisch sind, d.h. in einem Gebiet von ca. 3000km^2 können Schneeflächenbestimmungen sehr gut nur mit AVHRR-Daten durchgeführt werden.

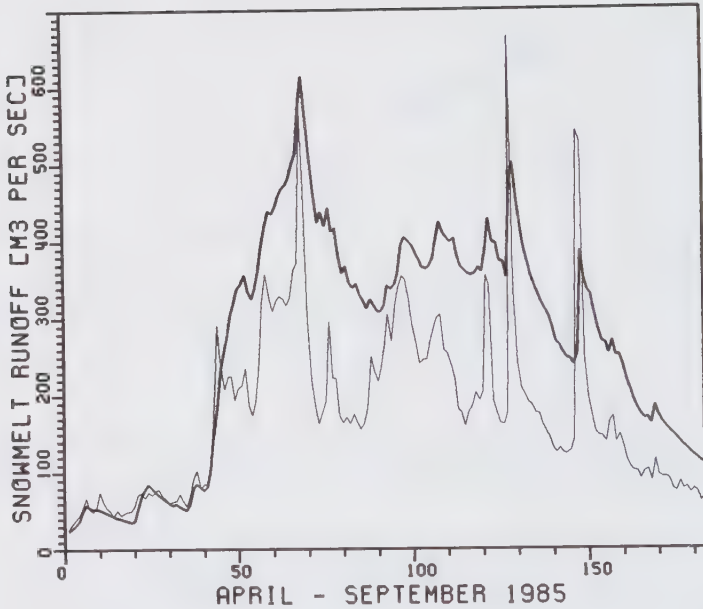


Abb. 34: Abflusssimulation 1985 basierend auf NOAA/AVHRR-Auswertungen (fett) im Vergleich mit dem natürlichen, rekonstruierten Abfluss (mager); Rhein-Felsberg

Auch in diesem Fall wird die synthetische Station (SYN85) verwendet. Ebenso werden die Modellparameter neu berechnet. Da die aus AVHRR- bzw. MSS-Daten hergeleiteten Schneeflächen fast identisch sind, wird nur eine Simulation durchgeführt (Abb. 34). Die Abweichungen nehmen stark zu: Das R^2 sinkt auf 0.26, die volumenmässige Differenz des Abflusses steigt auf $\Delta Q = -49.8\%$ (Tab. 15). Trotz genauer Schneeflächenbestimmungen sind sehr grosse Differenzen zu verzeichnen, die eindeutig auf die zu geringe Anzahl Höhenzonen und damit auf schlechte Temperaturextrapolationen zurückzuführen sind.

7.5. Beurteilung von Schneekartierungen und Abflusssimulationen

Aus Landsat-MSS- und NOAA/AVHRR-Daten lässt sich periodisch die Schneedecke und ihre Variationen im Verlauf der Ausaperungsperiode ermitteln. Graphisch werden diese Veränderungen als Schneebedeckungskurven dargestellt. Zwischen den auf MSS- bzw. AVHRR-Auswertungen basierenden Kurven sind Differenzen zu erkennen, die hauptsächlich auf das geringere Auflösungsvermögen von AVHRR-Daten zurückzuführen sind.

Wenn Abflusssimulationen basierend auf MSS- und AVHRR-Schneeflächendaten verglichen werden, treten Unterschiede auf, deren Ursachen z.T. auf zuwenig präzise Schneeflächen infolge des geringeren Auflösungsvermögens von AVHRR-Daten zurückzuführen sind. Die Simulationen zeigen, dass mit digitalen MSS-Schneeauswertungen in alpinen Gebieten gute Resultate erzielt werden können. Um beim Einsatz von AVHRR-Auswertungen zur Abflusssimulation vergleichbare Resultate zu erhalten, müssen zwei Voraussetzungen beachtet werden: Erstens muss eine minimal auszuwertende Fläche (600-1000km²) zur Verfügung stehen und zweitens darf die Schneebedeckung nicht eringer als ca. 20% sein. Bei zonalen Schneeflächenbestimmungen und Abflusssimulationen kann eine minimale Fläche pro Höhenzone erreicht werden, indem eine angemessene Anzahl Höhenzonen bestimmt wird.

Die Simulationsresultate fallen bei einer Reduktion der Anzahl Höhenzonen wegen schlechterer Temperaturextrapolation weniger gut aus. Die resultierenden Abweichungen liegen im Bereich der Erwartungswerte. NOAA/AVHRR-Daten stellen somit eine gute Möglichkeit zur Schneeflächenauswertungen in alpinen Einzugsgebieten dar. AVHRR-Schneebedeckungskurven sollten jedoch zumindest am Anfang und gegen Ende der Ausaperungsperiode mit Landsat-MSS-Schneeauswertungen geeicht werden.

Bei der Benutzung des SRM scheint der Schritt von Schneeschmelz-Abflusssimulationen zur Vorhersage möglich, sobald die Verfügbarkeit von Fernerkundungsdaten und meteorologischen Werten langfristig garantiert ist. Eine derartige Garantie muss auch den Datenempfang für ein bestimmtes Gebiet zu einem bestimmten Zeitpunkt beinhalten. Da aufgrund dieser Untersuchung nunmehr

die Möglichkeit besteht, Landsat-MSS- mit NOAA/AVHRR-Schneeflächenauswertungen zu ergänzen, ist eine Prognose von Schneeschmelz-Abflussmengen in greifbare Nähe gerückt.

8. AUSBLICK

Die methodischen Schritte zur Schneeflächenbestimmung mittels Satellitendaten und zur Simulation des Schneesmelzabflusses sind durch diese Arbeit soweit gediehen, dass in einer nächsten Phase der Abflussberechnungen vom Simulations- in den Prognosemodus übergegangen werden kann. Einfache Modelle wie z.B. das SRM haben eine grössere Chance, diesen Schritt zu vollziehen, da die benötigten Daten über die Schneefläche und die meteorologischen Verhältnisse nicht nur gemessen, sondern auch prognostiziert werden müssen. Aus diesem Grund sind gewisse Modifikationen in der Handhabung des SRM's und der benötigten Inputdaten erforderlich.

8.1. Weiterentwicklung der Schneebedeckungskurven

Ein wichtiger Faktor um Abflussprognosen überhaupt durchführen zu können, ist der rasche und automatische Empfang der Inputvariablen unmittelbar nach deren Messung. Um die Schneesmelze für die kommenden Tage und Wochen zu berechnen ist auch die Vorhersage des künftigen Verlaufs der Schneebedeckungskurven von Bedeutung. Die Standard-Schneebedeckungskurven (Typ I), in denen die Schneedecke in Funktion der Zeit dargestellt wird, sind durch die anfängliche Schneeakkumulation, die Temperatur und die Häufigkeit von Schneefällen während der Schmelzperiode beeinflusst. Extrem hohe oder tiefe Schneeakkumulationen können bei diesen Kurven nicht erkannt werden. Eine rasche Abnahme der Schneedecke (steile Kurve) kann entweder eine geringe Schneeakkumulation oder hohe Schmelzraten bedeuten. Umgekehrt resultiert eine langandauernde Abnahme der Schneedecke von einer hohen Schneeakkumulation oder tiefen Schmelzraten. Verursacht wird dieses unterschiedliche Verhalten durch die jährlich wechselnden Wetterbedingungen: Temperaturen tiefer als normal und häufige Schneefälle während der Schmelzperiode haben ein langsames Abschmelzen der saisonalen Schneedecke zur Folge. Temperaturen über dem Mittelwert und keine Schneefälle während der Ausaperungszeit bewirken ein rasches Abschmelzen. Der Verlauf derartiger Kurven kann nicht prognostiziert werden. Diese Einflüsse können aber eliminiert werden, indem "modifizierte Schneebedeckungskurven" (MARTINEC, 1985a) hergeleitet werden, welche die Schneedecke in Beziehung zur Anzahl akkumulierter Grad-Tage setzt. Da der Effekt von Temperaturfluktuationen damit beseitigt werden

kann, ist die Kurve in einem Jahr mit niedriger Schneedecke sehr steil und bei hoher Schneeakkumulation sehr flach. Einige Einflüsse können aber auch mit diesen neuen Schneebedeckungskurven (Typ II) wegen der variierenden Häufigkeit von Schneefällen während der Ausaperungszeit nicht beseitigt werden.

In einer dritten Version von Schneebedeckungskurven (Typ II') werden die Grad-Tage, die nötig sind, um eine Neuschneesicht während der Ausaperungszeit wegzuschmelzen, von den akkumulierten Grad-Tagen subtrahiert. Die daraus folgende Beziehung zwischen der Anzahl Grad-Tage, die auf die saisonale Schneedecke einwirken, und der Schneebedeckung ist unabhängig von den genannten Wetterbedingungen und sollte für eine gegebene Schneebedeckung immer dieselbe bleiben.

Grad-Tage aber sind variabel, abhängig von der Albedo, dem Metamorphosegrad, der Windgeschwindigkeit und periodischen Regenfällen (HALL & MARTINEC, 1985; Seite 70). Die Unterschiede werden noch verstärkt, da die Bedingungen, die das Grad-Tag-Verhältnis erhöhen oder reduzieren, nicht die ganze Ausaperungszeit andauern. Die Grad-Tage werden deshalb wiederum ersetzt durch akkumulierte Schneeschmelztiefen (Typ III), die täglich aus der Anzahl Grad-Tage (zusammen mit subtrahierten Grad-Tagen, die benötigt werden, um Neuschnee zu schmelzen) berechnet werden, indem die entsprechenden Grad-Tag-Verhältnisse verwendet werden. Die Fläche unter den Schneebedeckungskurven vom Typ III ist direkt proportional zum Schmelzwasservolumen. Diese Kurven zeigen nicht nur das anfänglich in der Schneedecke gespeicherte Wasservolumen (üblicherweise am 1. April), sondern auch das bis zu einem gewissen Zeitpunkt geschmolzene Wasser. Die Schneebedeckungskurven vom Typ III werden erhalten, indem vom Beginn der Schneeschmelze bis zu einem bestimmten Zeitpunkt (Satellitenüberflug) jede Schneeflächenmessung zur totalen Schneeschmelztiefe in Beziehung gestellt wird. Diese Kurve ist immer dieselbe für eine gegebene, anfängliche Schneeakkumulation (ausgedrückt in Wasseräquivalent) und ist vollkommen unabhängig von Wettereinflüssen.

Diese "modifizierten Schneebedeckungskurven" vom Typ III werden für beide hier verwendeten Jahre (1982/1985) hergeleitet (Abb. 35). Das für die mittlere Höhenzone (C) in der Schneedecke gespeicherte Wasservolumen, bezogen auf den 1. April 1982, beträgt 437 Mio. m³, was einem Wasseräquivalent von 52.6 cm entspricht. Die entsprechenden Werte betragen für das Jahr 1985

300 Mio. m³ bzw. 41.1 cm. Diese Daten bestätigen die in Kapitel 5.7. aufgrund der Winterberichte (WINTERBERICHTE DES EISLF, 1983 und 1986) gemachte Feststellung, dass es sich 1982 um ein schneereiches Jahr handelte. Weiter kann aus Abb. 35 geschlossen werden, dass die Mächtigkeit der Schneedecke 1982 deutlich grösser war als 1985, da bedeutend mehr Grad-Tage zum vollständigen Schmelzen der Schneedecke notwendig waren.

Ueber den Zeitpunkt der endgültigen Ausaperung geben die modifizierten "Schneebedeckungskurven" keine Auskunft. Greift man jedoch für diese Frage auf die Standard-Kurven zurück (Abb. 21 und 22), kann festgestellt werden, dass trotz der geringeren Schneehöhen im Jahr 1985 die Ausaperung etwas länger andauerte als 1982, bedingt durch kühlere Witterung mit weniger Grad-Tagen.

Aufgrund der "modifizierten Schneebedeckungskurven" ist somit ein direkter Vergleich verschiedener Jahre und Regionen bezüglich des zu einem bestimmten Zeitpunkt in der Schneedecke gespeicherten Wassers möglich.

8.2. Weitere Verwendungsmöglichkeit der Schneebedeckungskurven

Wie in Kapitel 8.1. gezeigt, können die "modifizierten Schneebedeckungskurven" verschiedener Regionen miteinander direkt verglichen und das zugehörige Wasseräquivalent bestimmt werden. Das Wasseräquivalent entspricht der vertikalen Schneelast, bezogen auf eine Einheitsfläche. Es ist naheliegend, die Schneelast in Beziehung zur maximal möglichen Dachlast von Gebäuden zu stellen. In den Alpen besteht von Seiten des Baugewerbes das dringende Bedürfnis, bei der Konstruktion von Gebäuden auf Angaben über die regional und höhenmässig variierenden Dachlasten zurückgreifen zu können. Bisherige Angaben, wie sie vom Eidgenössischen Institut für Schnee- und Lawinenforschung in Davos erhoben wurden, standen nicht flächendeckend zur Verfügung, da die Daten auf Punktmessungen beruhten. Werden die "modifizierten Schneebedeckungskurven" in extrem schneereichen Jahren für verschiedene Regionen erstellt, lassen sich daraus Schneelastenkarten ableiten, welche die regionalen und höhenmässigen Variationen der Schneelasten im Alpenraum wiedergeben.

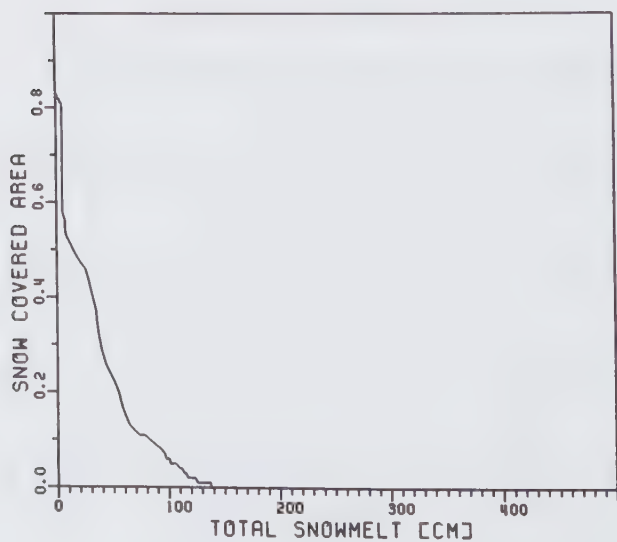
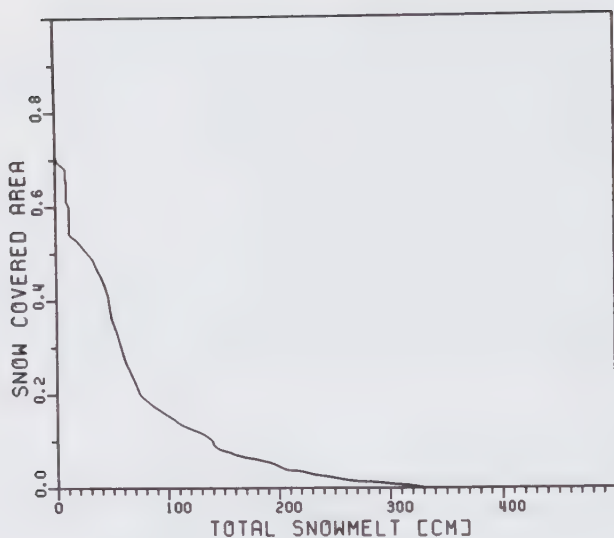


Abb. 35: "Modifizierte Schneebedeckungskurven" (Typ III) für 1982 (oben) und 1985 (unten); Höhenzone C, Rhein-Felsberg

8.3. Bessere Handhabung des Abflussmodells durch die Entwicklung eines Experten-Systems

ENGMAN et al. (1986) zeigen, welche Richtung in der Entwicklung von zukünftigen hydrologischen Modellen eingeschlagen wird: Das SRM dient als Basis für ein Experten-System für Abflussprognosen (EXSRM). Der momentane Stand von komplexen hydrologischen Modellen weist Charakteristika auf, die ideal für die Entwicklung von Experten-Systemen erscheinen: Sie sind datenintensiv und verlangen vom Benutzer viele Entscheidungen, die auf seinem Wissen und seiner Erfahrung basieren.

Experten-Systeme sind wissensbasierte Informationssysteme (APPELRATH & KRIZ, 1986), die:

- a) Wissen eines Fachgebietes in einer Wissensbank speichern sowie die Erfassung des Wissens und seine problemangepasste Repräsentation bzw. einfache Aenderbarkeit im Rechner unterstützen.
- b) Schlussfolgerungen aus der Wissensbank mittels einer Lösungskomponente ziehen, dadurch neues Wissen ableiten und somit Probleme lösen. Der Lösungsprozess sollte für den Benutzer transparent sein und ihm auf Anfrage auch erklärt werden. Der Dialog mit dem Benutzer sollte komfortabel und der Anwendung angepasst sein.

Der ideale Anwendungsbereich von Experten-Systemen liegt bei gut definierten Problemen, die sehr hohe Anforderungen an Sachkenntnisse stellen. Typische Anwendungen beinhalten die Interpretation riesiger Datenmengen oder Interpretationen von Daten, die ständig wiederholt oder periodisch (z.B. täglich oder stündlich) empfangen werden. Andere Anwendungen behandeln Probleme, die jahrelange Erfahrung und eine grosse Menge unüblicher Fakten im Zusammenhang mit dieser Erfahrung erfordern. D.h. ein Experten- System basiert auf der Entschlüsselung von menschlichem Wissen und auf Prozessen, die logische Entscheidungen machen (Inference Procedure). Das Resultat ist ein Programm, das Entscheidungen aufgrund von Wissen, Erfahrung und Beurteilung ausführen kann.

Das Experten-System, das für das SRM entwickelt wird, ist abhängig von hochauflösenden Graphiken und einem verständlichen Benutzer-Interface. Ein Teil des Codes ist in der LISP-, ein anderer in der ART-Sprache geschrieben. Das ART-Programm ist der übergeordnete Experten-System-Manager des Systems. Innerhalb des ART-Codes liegt die Wissensbasis und die verschiedenen Gesetze, die LISP- und FORTRAN-Codes aufrufen. LISP war ursprünglich die Sprache für den SYMBOLICS 3670 LISP-Rechner und wird heute für die meisten AI-Anwendungen (Artificial Intelligence) eingesetzt. Vorteil von LISP-Rechnern ist die 5 bis 10 mal schnellere Abarbeitung von Programmen, da einfache Instruktionen hardwaremässig implementiert sind. Die LISP-Sprache ermöglicht die Verwendung von FORTRAN-Codes, so dass das SRM-FORTRAN-Modell in keiner Weise verändert werden muss. Das Experten-System für sich beinhaltet die Summe aller Aktivitäten, die zur Datenaufbereitung und Bestimmung der Parameter nötig sind.

Die Wissensbasis besteht anfänglich aus Daten und anderen bearbeitungsspezifischen Informationen, wie der Lage des Einzugsgebietes und von Wetterstationen. Während der Vorbereitungsphase zur Simulation oder Prognose bereiten ART- oder aufgerufene LISP-Codes die benötigten Inputparameter und Daten vor. Danach ruft der Experten-System-Manager das FORTRAN-Modell, das den Abfluss zu berechnen hat. Ist der Abfluss berechnet, so werden die Resultate durch den Experten-System-Manager kontinuierlich geprüft, sei dies entweder durch Vergleich von simulierten mit gemessenen Daten oder durch Beurteilung des Benutzers. Sind die Resultate nicht befriedigend, kann der Benutzer eine Serie von maschinenunterstützten Modifikationen vornehmen. Generell beinhalten die Anpassungen eine neue Berechnung der Parameter oder das Austauschen von Koeffizienten, entsprechend den im voraus definierten Gesetzen. Neue Parameter und Koeffizienten modifizieren die Wissensbasis und führen automatisch zu einer neuen Abflussberechnung.

8.4. Notwendige Verbesserungen

In Hinsicht auf operationelle Abflussprognosen müssen im Schema der Datenbeschaffung und der Satellitenbildverarbeitung folgende Verbesserungen vorgenommen werden:

- a) Die Erstellung digitaler Wolkenmasken, für welche die Schneeflächen re-konstruiert werden müssen, ist heute zeitaufwendig. Es ist dringend eine Automation anzustreben. Eine Möglichkeit dazu bieten Satelliten, wie z.B. der Landsat-Thematic-Mapper, mit Sensoren im oberen Bereich des Nahinfrac-rot.
- b) Um die präzise Herleitung der Schneebedeckungskurven zu verbessern, soll-ten Daten weiterer Systeme, wie etwa SPOT oder MOS eingesetzt werden. Durch ihr hohes räumliches Auflösungsvermögen stellen sich keine Probleme bezüglich genauer Schneeauswertungen. Dagegen ist aber zu erwarten, dass neue digitale Bildverarbeitungsmethoden entwickelt werden müssen.
- c) Die meteorologischen Daten werden automatisch an die SMA übermittelt, sind aber nicht sofort auf einem Rechner greifbar. Im Hinblick auf ope-rationelle Prognosen müssen die Daten direkt auf einen Rechner transfe-riert, aufbereitet und zur sofortigen Weiterverarbeitung bereitgestellt werden.
- d) Was bis heute noch nicht zu befriedigen vermag, ist die Verteilung von Landsat-MSS-Daten. Die Daten müssen für operationelle Anwendungen späte-stens zwei bis drei Tage nach dem Empfang verarbeitet sein. Diese Zeit-spanne kann nur eingehalten werden, wenn die Daten kurz nach Empfang auch zur Verarbeitung bereitstehen. Direkte Verbindungen zwischen Empfangssta-tion und Benützer via Kommunikationssatelliten, wie z.B. APOLLO, erlauben einen raschen Datentransfer.
- e) Die Schneeauswertungen können vereinfacht werden, wenn alle ausgewerteten Bilder katalogisiert werden. Neuen Bildern kann dann durch optischen oder rechnerischen Vergleich (auf dem Bildverarbeitungssystem) mit katalogi-sierten, bereits ausgewerteten Bildern eine relative Schneebedeckung zu-gewiesen werden, ohne dass eine Klassifikation notwendig ist.

9. ZUSAMMENFASSUNG

Ziel der Untersuchungen ist die Simulation des Schmelzwasser-Abflusses zur besseren Ausnutzung der Wasserkraft in den Alpen, basierend auf digitalen Schneeflächenbestimmungen mittels Fernerkundungsdaten.

Die Simulationen beruhen auf dem "Snowmelt Runoff Model" (SRM) von MARTINEC. Als wichtigste Inputvariable benötigt es – im Unterschied zu anderen Abflussmodellen – Angaben über die Schneefläche und ihre Veränderungen im Verlauf der Ausaperungsperiode. Die Schneeflächen werden periodisch mit Hilfe von Landsat-MSS- und NOAA/AVHRR-Daten gemessen, die dann mittels digitalen Bildverarbeitungstechniken ausgewertet werden. Daraus können die sogenannten Schneebedeckungskurven (Depletion Curves) hergeleitet werden, denen dann die täglichen Variationen der Schneedecke entnommen werden können. Diese Schneeschmelz-Abflussimulationen werden in einem grösseren alpinen Einzugsgebiet (Rhein-Felsberg, 3249km²) für die Ausaperungsperioden 1982 und 1985 durchgeführt.

Schneeflächenbestimmungen:

Für eine präzise Herleitung der Schneebedeckungskurven werden regelmässig, z.B. wöchentlich einmal, Satellitenaufnahmen benötigt. Das bisher für Schneekartierungen verwendete Landsat-MSS-System erlaubt zwar detaillierte Auswertungen, weist jedoch mit 16 (Landsat 4, 5) bzw. 18 Tagen (Landsat 1-3) für unsere Problemstellung einen zu langen Repetitionszyklus auf. Um trotzdem eine genaue Erfassung der Schneeflächenvariationen zu gewährleisten, wurden NOAA/AVHRR-Daten in das Schema der Schneeflächenauswertungen integriert. Der NOAA-Satellit weist mit seinem 12-Stunden-Repetitionszyklus einen grossen Vorteil auf. Umgekehrt schränkt die relative grobe räumliche Auflösung die Präzision der Schneeflächenbestimmungen im Gebirge ein.

Die vorliegenden Untersuchungen haben gezeigt, dass sich NOAA/ AVHRR-Daten trotz des relativ groben räumlichen Auflösungsvermögens für digitale Schneeflächenbestimmungen in grossen alpinen Einzugsgebieten eignen. Bedingungen dafür sind eine minimale Grösse der auszuwertenden Fläche von ca. 600 -

1000km² und eine Schneebedeckung von mindestens 20%. Bei geringerer Schneebedeckung kann die Verteilung der Schneedecke nur noch ungenügend gemessen werden.

Zuerst mussten verschiedene Vorverarbeitungsschritte durchgeführt werden. Für das Jahr 1982 waren in praktisch allen Aufnahmen Daten- und Systemfehler zu beseitigen. Um eine Vergleichbarkeit aller Daten garantieren und Flächenmessungen vornehmen zu können, wurde in einem weiteren Schritt eine Geokodierung auf das Koordinatensystem der Schweizerischen Landeskarte mittels der Passpunktmethode und einer affinen Rückwärts-Transformation vorgenommen.

Die Landsat-MSS-Aufnahmen wurden digital zusammengehängt ("mosaikiert"), da das Einzugsgebiet Rhein-Felsberg im Ueberlappungsbereich zweier Szenen liegt.

Wegen der relativ schlechten zeitlichen Auflösung von Landsat mussten auch Szenen mit bis zu 28% Bewölkung berücksichtigt werden. Am interaktiven Bildverarbeitungssystem wurden digitale Wolkenmasken erstellt. Für die wolkenbedeckten Gebiete wurde dann die Schneefläche mittels Extrapolation rekonstruiert.

Nach diesen Vorverarbeitungsschritten wurden die Satellitendaten unter Verwendung der MSS-Kanäle 5 und 7 bzw. AVHRR-Kanäle 1 und 2 mittels überwachter Verfahren klassifiziert. Am häufigsten wurde der Minimum-Distance-Klassifikator eingesetzt.

Dank der Geokodierung liessen sich die einzelnen klassifizierten Bilder leicht zu einem multivariaten Datensatz zusammenzustellen. Darin vereint wurden zudem das Digitale Gelände-Modell (Höhe, Exposition, Neigung) und die "Region of Interest"-Maske (Einzugsgebiet und Teilgebiete).

Flächenstatistische Auswertungen liessen sich dadurch für die verschiedenen Höhenzonen durchführen, wie sie vom Abflussmodell verlangt werden. Die Resultate dieser Auswertungen sind Angaben über die relative Schneebedeckung zu einem bestimmten Zeitpunkt in einer bestimmten Höhenzone für das gesamte sowie für die Teilgebiete. Aus diesen Werten lässt sich die Schneebedeckung

in Funktion der Zeit graphisch darstellen. Aus derartigen Schneebedeckungskurven können dann die täglichen Schneebedeckungswerte ermittelt werden, die als eine wesentliche Inputvariable für das Abflussmodell dienen.

Abflusssimulationen:

Die Simulationen des Schmelzwasser-Abflusses mit dem SRM wurden für die beiden Ausaperungsperioden 1982 und 1985 durchgeführt.

1982 war ein schneereiches Jahr mit fast normaler Ausaperungszeit, 1985 hingegen ein schneearmer Winter. Wegen bedeutenden Niederschlägen im Frühjahr und Sommer und zugleich unterdurchschnittlicher Sonnenscheindauer aperte das Gebiet verspätet aus. Die Simulationen wurden mit dem natürlichen Abfluss verglichen, der aufgrund der Input/Output-Daten der Kraftwerk-Bewirtschaftung rekonstruiert wurde. Daraus lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

- Landsat-MSS-Schneeflächenbestimmungen in fünf Höhenzonen erlauben präzise Abflusssimulationen in einem grossen alpinen Einzugsgebiet von ungefähr 3300km².
- Mit Landsat-MSS-Daten sind oft zuwenig auswertbare Aufnahmen vorhanden, weshalb die Schneeflächenabnahme zu wenig genau hergeleitet werden kann, was wiederum Auswirkungen auf die Simulationsgüte zeigt.
- Mit NOAA/AVHRR-Daten sind präzise Schneeflächenbestimmungen bei einer minimalen Fläche von 600 - 1000km² möglich. Bei Schneebedeckungen von <20% treten jedoch Ungenauigkeiten auf. In einem solchen Fall müssen MSS-Auswertungen beigezogen werden. Zur Eichung der Schneebedeckungskurven empfiehlt es sich, mindestens zu Beginn und am Ende der Ausaperungsperiode eine MSS-Auswertung einzusetzen.
- AVHRR-Daten bilden in Kombination mit MSS-Daten eine sinnvolle und brauchbare Datenbasis zur Herleitung von Schneebedeckungskurven für Schneeschmelz-Abflusssimulationen.

- Beim Einsatz von AVHRR-Daten im untersuchten Gebiet Rhein-Felsberg können maximal drei Höhenzonen ausgeschieden werden, damit eine den Minimalforderungen entsprechende Fläche erhalten wird und gute Simulationsresultate erzielt werden.
- Bei einer weiteren Reduktion der Anzahl der Höhenzonen nimmt die Simulationsgüte stark ab.
- Das Verfahren ist methodisch jetzt soweit entwickelt, dass – unter Berücksichtigung gewisser Modifikationen – aus dem Simulations- in den Prognosemodus übergegangen werden kann. Voraussetzung sind die Verfügbarkeit der benötigten Satelliten- und Witterungsdaten in quasi Echtzeit.
- Modifizierte Schneebedeckungskurven lassen sich auch für die Berechnung unterschiedlicher Schneevolumen verschiedener Regionen in den Alpen benutzen.

Die vorliegende Untersuchung zeigt, dass das SRM für die Kraftwerksgesellschaften ein wertvolles Planungsinstrument zur Prognose des Schmelzwasser-Abflusses und damit zur effizienten und ökonomischen Nutzung der Wasservorräte in den Alpen darstellt.

SUMMARY

The objective of the investigations is to simulate snowmelt-runoff in order to improve the utilization of water resources in the Alps. The simulations are based on snow cover determination by remotely sensed data.

The simulations use MARTINEC's 'Snowmelt Runoff Model' (SRM). Its most important input variable is - in contrast to other runoff models - the area of snow cover and its variations during the ablation period. Snow cover is determined periodically from Landsat-MSS- and NOAA/AVHRR-data. Further analysis is carried out by digital image processing techniques, resulting in 'depletion curves', which represent the daily variations of the snow cover. Snowmelt runoff simulations are calculated for a large alpine basin (Rhein-Felsberg, 3249km²) for the ablation periods of 1982 and 1985.

Determination of Snow Cover:

For a precise derivation of the depletion curves, weekly satellite images are necessary. Up to now, snow cover mapping has been carried out with the Landsat-MSS systems, which are useful for detailed analyses, but their repetition cycles of 16 (Landsat 4, 5), and 18 days (Landsat 1-3) are not sufficient for periodical snow cover mapping. Hence, NOAA/AVHRR data are integrated in the analyses. The 12 hour repetition cycle allows recordings of short-term variations in snow cover. On the other hand, spatial resolution is poor, so that the precision of snow cover determinations in rugged terrain is low.

The investigations show that NOAA/AVHRR data are suitable for digital snow cover determinations in large alpine basins despite of the poor spatial resolution. However, a minimum size of the area analyzed (about 600 - 1000km²) and a snow coverage of at least 20% are required.

In order to determinate snow cover, preprocessing procedures must be carried out. First, the data are geocoded onto the coordinate system of the Swiss Topographic Maps, using the control-point method and an affine backward

transformation. This ensures, that all data sets are comparable, and that areas can be measured.

Secondly, the snow coverage of areas covered by clouds must be estimated by an extrapolation method. This is necessary, since scenes with up to 28% cloud coverage are included in the data sets, due to low temporal resolution of the Landsat satellite.

Following the preprocessing procedures, the satellite data are classified by using MSS-channels 5 and 7, as well as AVHRR-channels 1 and 2. Most frequently the images are classified by the supervised Minimum-Distance algorithm.

The classified images are merged into a multivariate data set, which also incorporates the Digital Terrain Model (elevation, aspect, slope), and the "region of interest"-mask (basin, subbasins). Using the multivariate data set it is thus possible, as required by the SRM, to determine the relative snow coverage of each elevation zone, separately either for the whole basin or for various subbasins. The relative snow coverage may be represented as a function of time (snow cover depletion curves). These daily values, together with precipitation and air-temperature data, serve as main input to the SRM.

Simulations of Runoff:

The snowmelt runoff simulations are carried out with the SRM for the ablation periods of 1982 and 1985. The year 1982 was characterized by a heavy and long accumulation period followed by a nearly normal ablation period. In contrast, in 1985 less snow was accumulated but the melting period lasted longer since heavy precipitations occurred throughout spring and early summer. The result of the simulations are compared to natural runoff data, which are reconstructed from the input/output data of hydro-powerstations. This allows the following conclusions:

- Snow cover determination by Landsat-MSS data for five elevation zones allows precise runoff simulations in a large alpine basin of about 3300km².

- When only data from the Landsat-MSS are used, the number of images frequently does not suffice for analyses. It is not possible to calculate the decrease of snow cover precisely, so that the precision of the runoff simulation is low.
- NOAA/AVHRR data allow exact snow cover determination if the examined area exceeds 600 - 1000km² and snow coverage exceeds 20%. Otherwise, MSS-interpretations must be carried out. To calibrate the depletion curves, usage of MSS data is recommended for the beginning and the end of the ablation period.
- In combination with MSS data, AVHRR data prove to be a reasonable and useful data-base to derive 'depletion curves' for snowmelt runoff simulations.
- In the investigated basin (Rhein-Felsberg), AVHRR data allow separation of not more than three elevation zones. Otherwise the minimum requirements on area size are not fulfilled, resulting in poor simulations.
- A decrease in the number of elevation zones results in poorer accuracy of the simulation.
- The procedure is now well advanced. It should be possible to change from simulation to the forecasting with only a few modifications. This would require, however, the availability of the satellite and climatic data virtually in real time.
- Modified depletion curves can also be used for the calculation of different snow volumes in different regions of the Alps.

The presented work shows, that the SRM is a valuable tool for snowmelt runoff forecasts in the Alps. For hydro-power companies, it could help efficient and economic planning of the utilization of the water resources in the Alps.

LITERATURVERZEICHNIS

- AKIMA, H. (1974) A Method of Bivariate Interpolation and Smooth Surface Fitting Based on Local Procedures, Commun. Ass. Comp. Mach., Vol 17, No. 1, pp. 18-20, 26-31.
- APPELRATH, H.-J. and KRIZ, J. (1986) Wissensbasierte Expertensysteme, In: Neue Zürcher Zeitung, Nr. 251, Mittwoch - 29. Okt., 1986.
- ASCHWANDEN, H. and WEINGARTNER, R. (1983) Die Abflussregimes der Schweiz, Geographisches Institut der Universität Bern, Abt. Hydrologie, Nr. 44.
- BAUMGARTNER, A. and REICHEL, E. (1975) Die Weltwasserbilanz (World Water Balance), Oldenbourg, München.
- BRAUN, L.N. (1985) Simulation of Snowmelt Runoff in Lowland and Lower Alpine Regions of Switzerland, Zürcher Geographische Schriften, Geographisches Institut der ETH Zürich, Heft 21.
- BUNDESAMT FUER UMWELTSCHUTZ (1985) Der Wasserhaushalt in der Schweiz, Landeshydrologische Mitteilungen 1.
- BURKART, U. (1986) Schneeflächenbestimmungen im analogen Satellitenbild, Diplomarbeit, Geographisches Institut der Universität Zürich, unveröffentlicht.
- DENEAU, V., LEPRIEUR, C. and SAINT, G. (1981) Télédétection de la Surface Enneigée sur les Plateaux du Massif Central, Société Hydrotechnique de France, Grenoble.
- DEWEY, K.F. and HEIM, R. (1981) Satellite Observations of Variations in Northern Hemisphere Seasonal Snow Cover, NOAA Technical Report NESS 87.
- DEY, B., GOSWAMI, D.C. and RANGO, A. (1983) Utilization of Satellite Snow Cover Observations for Seasonal Streamflow Estimates in the Western Himalayas, Nordic Hydrology, pp. 257-266.
- DEY, B. (1984) Evaluation of the Satellite Derived Snow Cover Area - Runoff Forecasting Models for the Inaccessible Basins of Western Himalayas, Symp. on Remote Sensing of Environment ERIM, Paris, pp. 1425-1432.
- DOZIER, J. (1981) Effect of Grain Size and Snowpack Waterequivalence on Visible and Near-Infrared Satellite Observations of Snow, Water Resources Research, Vol. 17, No. 4, pp. 1213-1221.
- DUDA, R.O. and HART, P.E. (1973) Pattern Classification and Scene Analysis, Wiley Interscience: New York.
- EGELI, E., GERIG, G., KLEIN, F. and KUEBLER, O. (1983) A Hardware and Software Optimized Program System for Interactive Image Processing, Architecture and Algorithms for Digital Image Processing, Proc. SPIE 435, pp. 134-138.

- ENGMAN, E.T., RANGO, A. and MARTINEC, J. (1986) An Expert-System for Snow-melt Runoff Modelling and Forecasting, Water Forum '86: World Water Issue in Evolution (Proc. of ASCE Conf./HY, IR,EE,WR,WW Divs., Long Beach, CA), pp. 174-180.
- FISHER, R.A. (1936) The Use of Multiple Measurements in Taxonomic Problems, Annals of Eugenics 7, Part II, pp. 179-188.
- FOEHN, M.B. (1985) Besonderheiten des Schneeniederschlags, In: Der Niederschlag in der Schweiz, Bericht der Arbeitsgruppe "Niederschlag", Editor: B. Sevruck, Hydrologische Kommission, Beiträge zur Geologie der Schweiz - Hydrologie, Nr. 31, Kümmerly und Frey, Bern.
- FOLEY, D.H. (1972) Considerations of Sample and Feature Size, IEEE Trans. Inform. Theory, Vol. IT-18, pp. 618-626.
- FREI, U. (1984) Geometrische Korrekturen von NOAA-AVHRR Daten, Remote Sensing Series, Vol. 8, Department of Geography, University of Zurich.
- FU, K.-S. and ROSENFELD, A. (1976) Pattern Recognition and Image Processing, IEEE Trans. Comput., Vol. C-25, pp. 1336-1346.
- GERIG, G. and SEIDEL, K. (1984) Structural Description of a Landsat-TM-Scene for Improved Region-Based Classification, Proceedings of IGARSS'84 Symp., Strasbourg, pp. 101-105.
- GFELLER, R.E. (1975) Untersuchungen zur automatischen Schneeflächenbestimmung mit Multispektral-Aufnahmen des Fernerkundungssatelliten ERTS-1, Dissertation, Geographisches Institut der Universität Zürich.
- HAEFNER, H. (1979) Digital Mapping of Mountain Snow Cover Under European Conditions, Final Workshop on the Operational Applications of Satellite Snow Cover Observations, Sparks, Nevada.
- HAEFNER, H. (1980a) Snowcover Monitoring from Satellite Data under European Conditions, In: Remote Sensing Application in Agriculture and Hydrology, Editor: G. Frayse, Proceedings of a Seminar held at the Joint Research Centre, Balkema, Rotterdam.
- HAEFNER, H. (1980b) Snow Surveys from Earth Resource Satellites in the Swiss Alps - A Review of Six Year's Research, Remote Sensing Series, Vol. 1, Department of Geography, University of Zürich.
- HALL, D.K. and MARTINEC, J. (1985) Remote Sensing of Snow and Ice, Chapman and Hall: London, New York.
- HARALICK, R.M. (1976) Automatic Remote Sensor Image Processing, In: Digital Picture Analysis, Editor: A. Rosenfeld, Topics in Applied Physics, Vol. 11, Springer: Berlin, Heidelberg, pp. 5-63.
- HOINKES, H. (1967) Glaciology in the International Hydrological Decade, IUGG General Assembly, Bern, IAHS Commission on Snow and Ice, Reports and Transactions, IAHS Publication No. 79, pp. 7-16.

HYDROLOGISCHES JAHRBUCH (1982 und 1985) Schweizerische Landeshydrologie, Bern.

ITTEN, K.I. (1980) Snow Mapping from Space Platforms, In: The Contribution of Space Observations to Water Resources Management, Editor: V.V. Salomonson and P.D. Bhavsar, COSPAR Symp., Bangalore, India.

ITTEN, K.I. STAENZ, K., BAUMGARTNER, M.F. and JOHNSON, Th. (1985) A Stepwise Hierarchical Multi-Binary Approach in TM Landuse Classification, Proc. of IGARSS'85 Symposium, Amherst, pp. 697-702.

JAEGGI, B. (1987) Schneeklassifikation mit digitalen NOAA/AVHRR-Daten: Ein Vergleich mit analogen Satellitenbildinterpretationen, Diplomarbeit, Geographisches Institut der Universität Zürich, unveröffentlicht.

JOSS J. and MUELLER, G. (1985) Instrumente, In: Der Niederschlag in der Schweiz, Bericht der Arbeitsgruppe "Niederschlag", Editor: B. Sevruck, Hydrologische Kommission, Beiträge zur Geologie der Schweiz - Hydrologie, Nr. 31, Kümmerly und Frey, Bern.

KELLER, M. (1981) Systematische Schneekartierung mit Landsat-MSS-Daten am Beispiel Dischma, Diplomarbeit, Geographisches Institut der Universität Zürich, unveröffentlicht.

KELLER, M. (1987) Ausaperungskartierung mit Landsat-MSS-Daten zur Erfassung ökologischer Einflussgrößen im Gebirge, Dissertation, Geographisches Institut der Universität Zürich (in press).

KELLER, M. and SEIDEL, K. (1984) Influence of Snow Cover Recession on an Alpine Ecological System, Proc. of XVIII International Symp. on Remote Sensing of Environment, Paris, France, pp. 1931-1936.

KHR (1978) Das Rheingebiet, Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes, Herausgeber für die Schweiz: Schweizerische Naturforschende Gesellschaft, Bern.

KIRBY, M.E. (1975) A Solution of the Geometric Base Problem in Landsat-1 (ERTS-1) Multispectral Scanner Data by Means of an Affine Transformation and the Method of Least Squares, M.A. Thesis, University of Waterloo, Ontario, Canada.

LANDSAT DATA USERS HANDBOOK (1980) Revised Edition, US Geological Survey.

LANG, H. and BRAUN, L.N. (1985) Schmelzwasser-Abfluss-Modelle für Schnee- und Gletschergebiete, In: Die Schneedecke in der Schweiz aus hydrologischer Perspektive, Arbeitsgruppe für operationelle Hydrologie (GHO), Landeshydrologie, Mitteilungen Nr. 1.

LAUFER, F. (1977) Weekly Control of Alpine Seasonal Reservoirs, Institut für Hydromechanik und Wasserwirtschaft, ETH Zürich, R 11-77.

LICHTENEGGER, J., SEIDEL, K., KELLER, K. and HAEFNER, H. (1981) Snow Surface Measurements from Digital Landsat-MSS Data, Nordic Hydrology, 12, pp. 275-288.

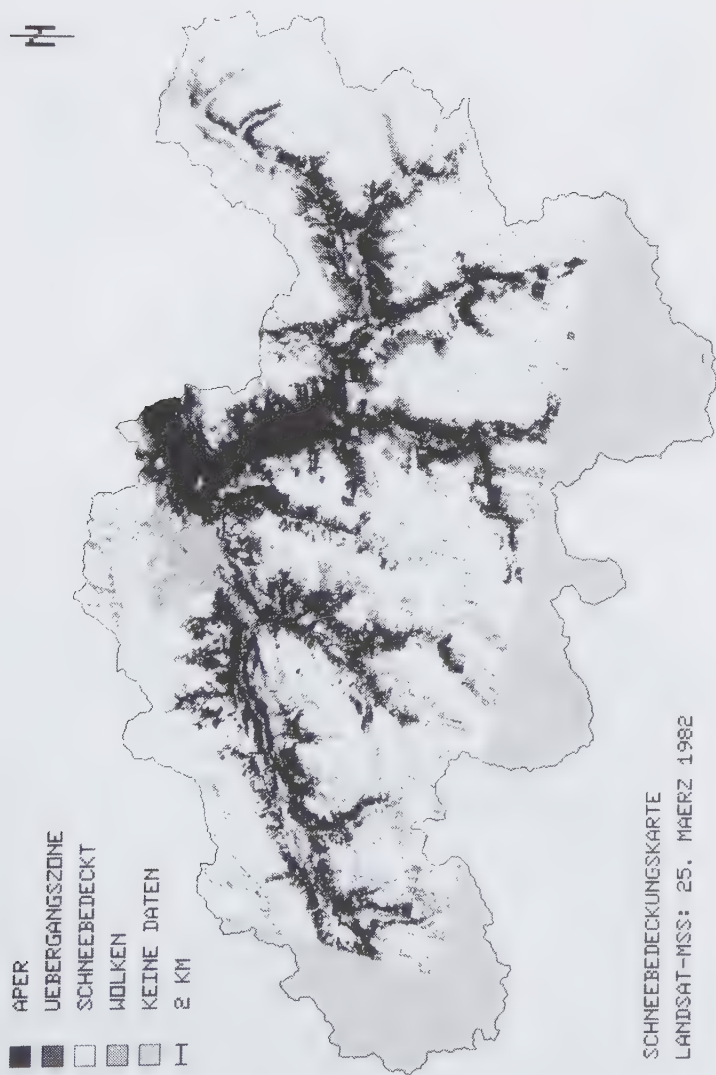
- MARBOUY, D., OBLED, Ch. and GUILLOT, P. (1978) Utilisation des Images de Satellites pour l'Etude de l'Enneigement et l'Amélioration des Prévisions Hydrologiques de Printemps, Réunion Société Hydrotechnique de France, Grenoble.
- MARTINEC, J. (1960) The Degree-Day Factor for Snowmelt Runoff Forecasting, IUGG General Assembly, Helsinki, IAHS Commission of Surface Waters, IAHS Publication No. 51, pp. 468-477.
- MARTINEC, J. (1965) A Representative Watershed for the Research of Snowmelt Runoff Relations, Budapest Symp., Representative and Experimental Areas, IAHS Publication No. 66, Vol. 2, pp. 494-501.
- MARTINEC, J. (1970) Study of Snowmelt Runoff Process in two Representative Watersheds with Different Elevation Range, Symp. on the Results of Research on Representative and Experimental Basins, Wellington, IAHS Publication No. 96, pp. 29-39.
- MARTINEC, J. (1975) New Methods in Snowmelt Runoff Studies in Representative Basins, Tokyo Symp., IAHS Publication No. 117, pp. 99-107.
- MARTINEC, J. (1976) Snow and Ice, In: Facets of Hydrology, Editor: J.C. Rodda, Wiley: London, pp. 85-118.
- MARTINEC, J. (1982) Runoff Modelling from Snow Covered Area, IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing, Vol. GE-20, No. 3, pp. 259-262.
- MARTINEC, J. (1984) Modelling the Snow Accumulation and Snowmelt Runoff, In: DVWK Mitteilungen Nr. 7, Schneehydrologische Forschung in Mitteleuropa, Hann. Gmünden, pp. 59-76.
- MARTINEC, J. (1985a) Snowmelt Runoff Models for Operational Forecast, Nordic Hydrology No. 16, pp. 129-136.
- MARTINEC, J. (1985b) Time in Hydrology, In: Facets of Hydrology, Vol. II, Editor: J.C. Rodda, Wiley: London, pp. 249-289.
- MARTINEC, J. (1985c) Application of the Remotely Derived Snow Data, In: Remote Sensing of Snow and Ice, Editor: D.K. Hall and J. Martinec, Chapman and Hall: London, New York.
- MARTINEC, J., RANGO, A. and MAJOR, E. (1983) The Snowmelt Runoff Model (SRM) User's Manual, NASA Reference Publication 1100, Scientific and Technical Information Branch.
- MARTINEC, J. and RANGO, A. (1986) Parameter Values for Snowmelt Runoff Modelling, Journal of Hydrology, 84, pp. 197-219.
- MUELLER, G (1985) Messnetze, In: Der Niederschlag in der Schweiz, Bericht der Arbeitsgruppe "Niederschlag", Editor: B. Sevruck, Hydrologische Kommission, Beiträge zur Geologie der Schweiz - Hydrologie, Nr. 31, Kümmerly und Frey, Bern.
- MURI, R. (1981) Verfahren zur grossräumigen, automatisierten Klassifikation von Schnee, Dissertation, Geographisches Institut der Universität Zürich.

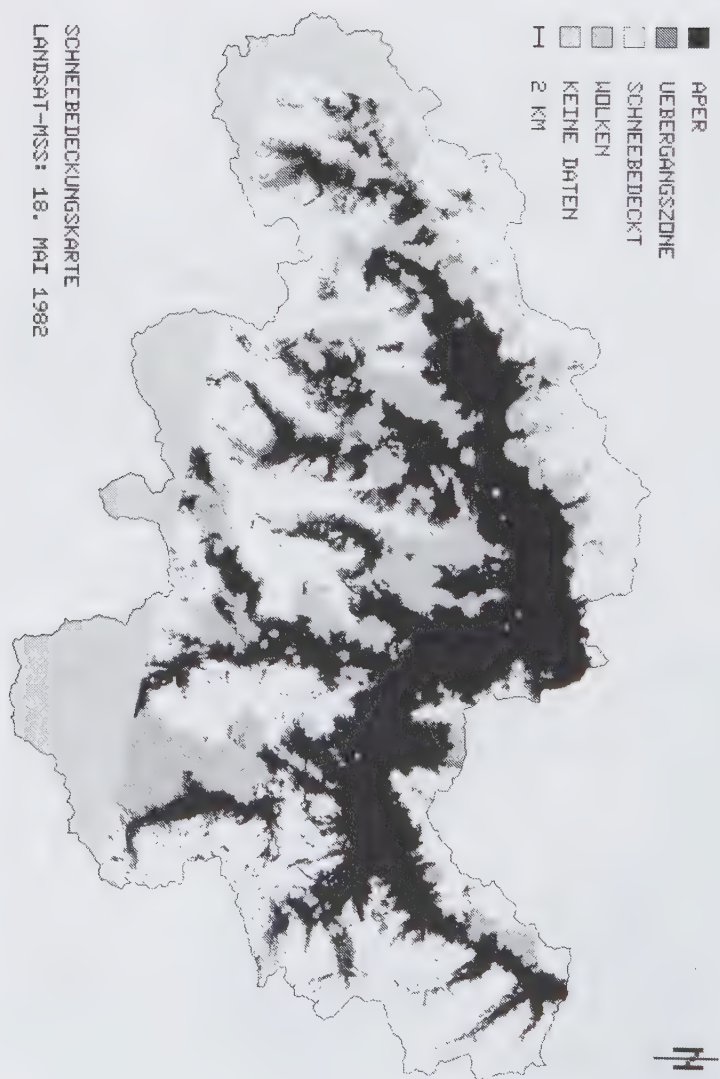
- NAGAO, M. and MATSUYAMA, T. (1980) A Structural Analysis of Complex Aerial Photographs, Plenum: New York.
- NASH, J.E. AND SUTCLIFFE, J.V. (1970) River Flow Forecasting Through Conceptual Models, Part I - A Discussion of Principles, Journal of Hydrology, Vol. 10, No. 3, pp. 282-290.
- NZZ (1986) Ausbau der Wasserkräfte im Wallis, Neue Zürcher Zeitung, Nr. 143 - Dienstag, 24. Juni 1986.
- O'BRIEN, H.W. and MUNIS, R. (1975) Red and Near Infrared Spectral Reflectance of Snow, CRREL Research Report 332, Hanover, New Hampshire.
- QUERVAIN, M.R. de (1972) Snow Structure, Heat and Massflux Through Snow, IAHS Publication No. 32, pp. 154-160.
- RANGO, A. (1985a) A Survey of Progress in Remote Sensing of Snow and Ice, In: Hydrological Applications of Remote Sensing and Remote Data Transmission (Proc. Hamburg Symp.), IAHS Publication No. 145.
- RANGO, A. (1985b) An International Perspective on Large Scale Snow Studies, Hydrological Sciences Journal 30, Vol. 2.6, pp. 225-238.
- RANGO, A. (1985c) Assessment of Remote Sensing Input to Hydrologic Models, Water Resources Bulletin, Vol. 21, No. 3, pp. 423-432.
- RANGO, A. (1985d) Results of the Snowmelt Runoff Model in an International Test, Western Snow Conference, Boulder, Colorado, pp. 99-106.
- RANGO, A., MARTINEC, J., FOSTER, J. and MARKS D. (1984) Resolution in Operational Remote Sensing of Snow Cover, In: Hydrological Applications of Remote Sensing and Remote Data Transmission (Proc. Hamburg Symp.), IAHS Publication No. 145.
- ROTT, H. (1978) Zur Schneekartierung in alpinen Einzugsgebieten aus Satellitenbildern, Zeitschrift für Gletscherkunde und Glaziologie, Bd. 14, H. 1, pp. 81-93.
- SCHOWENGERDT, R.A. (1983) Techniques for Image Processing and Classification in Remote Sensing, Academic Press, Inc.
- SCHUERMANN, J. (1977) Polynom Klassifikatoren für Zeichenerkennung, Oldenbourg: München, Wien.
- SEIDEL, K. (1976) Digitale Bildverarbeitung, Technischer Bericht, Photographisches Institut, ETH Zürich.
- SEIDEL, K., ADE, F. and LICHTENEGGER, J. (1983) Augmenting Landsat-MSS Data with Topographic Information for Enhanced Registration and Classification, IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, Vol. GE-21, No.3, pp. 252-258.
- SEV/VSE (1986) Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins und des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke, Nr. 8.
- SMA (1982 und 1985) Annalen der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt.

- STAENZ, K. (1976) Radiometrische Untersuchungen über das Reflexionsverhalten von Schnee, Diplomarbeit, Geographisches Institut der Universität Zürich, unveröffentlicht.
- STEINER, D. et al. (1972) Remote Sensing Input to Information Systems, Chapter 5, In: Geographic Data Handling, Editor: R.F. Tomlinson, IGU Commission of Geographical Data Sensing and Processing, Vol. 1, pp. 542-631.
- TOWNSHEND, J.R.G. and TUCKER, C.G. (1981) Utility of AVHRR of NOAA 6 and 7 for Vegetation Mapping, Conference on Matching Remote Sensing Technologies and their Applications, London, pp. 97-107.
- URFER, H.P. (1978) Routinemässige Schneekartierung in hydrologischen Einzugsgebieten mit Landsat-Daten, Diplomarbeit, Geographisches Institut der Universität Zürich, unveröffentlicht.
- WILDI, O. and EWALD, K. (1986) Der Naturraum und dessen Nutzung im alpinen Tourismusgebiet von Davos, Ergebnisse des MAB-Projektes Davos, Eidg. Anstalt für forstl. Versuchsw., Birmensdorf.
- WINTERBERICHT DES EISLF (1983) Schnee und Lawinen in den Schweizer Alpen (1981/1982), Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung, Weissfluhjoch-Davos, Nr. 46.
- WINTERBERICHT DES EISLF (1986) Schnee und Lawinen in den Schweizer Alpen (1984/1985), Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung, Weissfluhjoch-Davos, Nr. 49.
- WITMER, U. (1984) Eine Methode zur flächenhaften Kartierung von Schneehöhen unter Berücksichtigung von reliefbedingten Einflüssen, Geographica Bernensis, G 21, Geographisches Institut der Universität Bern.
- WITMER, U., FILLIGER, P., KUNZ, St. und KUENG, P. (1986) Erfassung, Bearbeitung und Kartierung von Schneedaten in der Schweiz, Geographica Bernensis, G 24, Geographisches Institut der Universität Bern.
- WMO (1982) WMO Project for the Intercomparison of Conceptual Models of Snowmelt Runoff, Symp. on Hydrological Aspects of Alpine and High Mountain Areas in Exeter, IAHS Publication No. 138, pp. 193-302.
- WMO (1986) Intercomparison of Models of Snowmelt Runoff, Operational Report No. 23, World Meteorologic Organisation, Geneva.

ANHANG I:

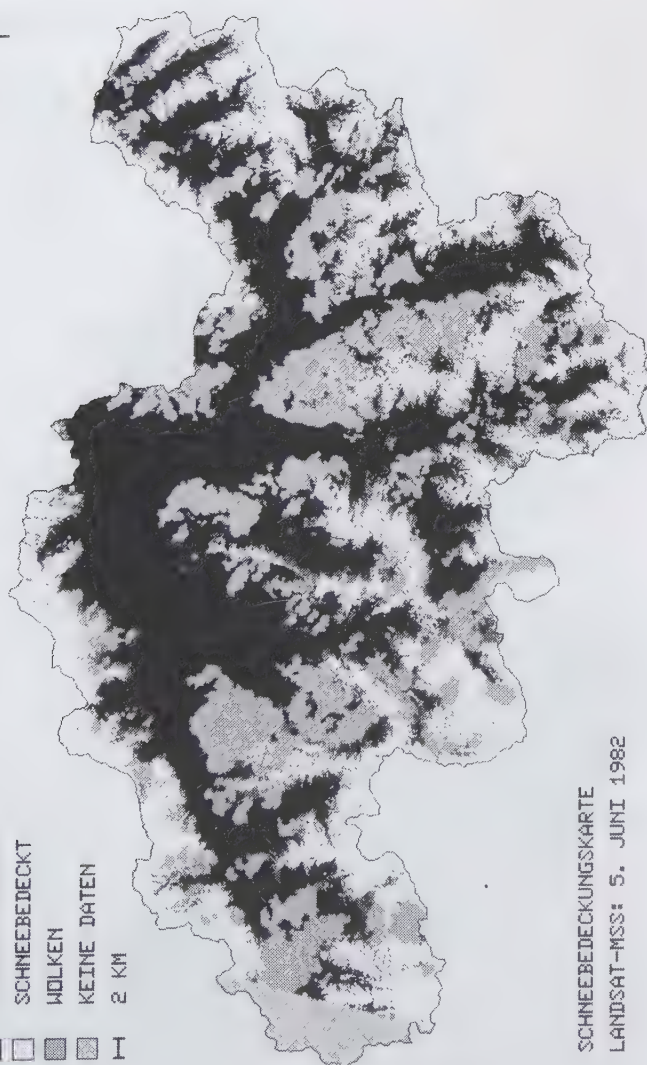
Schneebedeckungskarten 1982







- APER
- UEBERGANGSZONE
- SCHNEEBEDECKT
- WOLKEN
- KEINE DATEN
- 2 KM

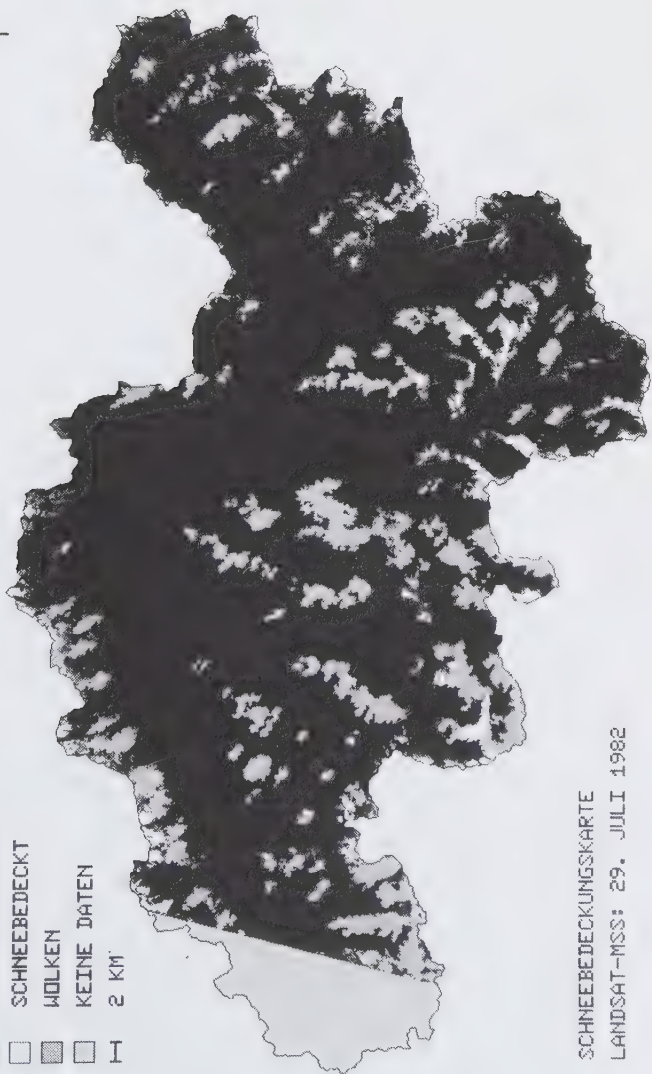


SCHNEEBEDECKUNGSKARTE
LANDSAT-MSS: 5. JUNI 1982



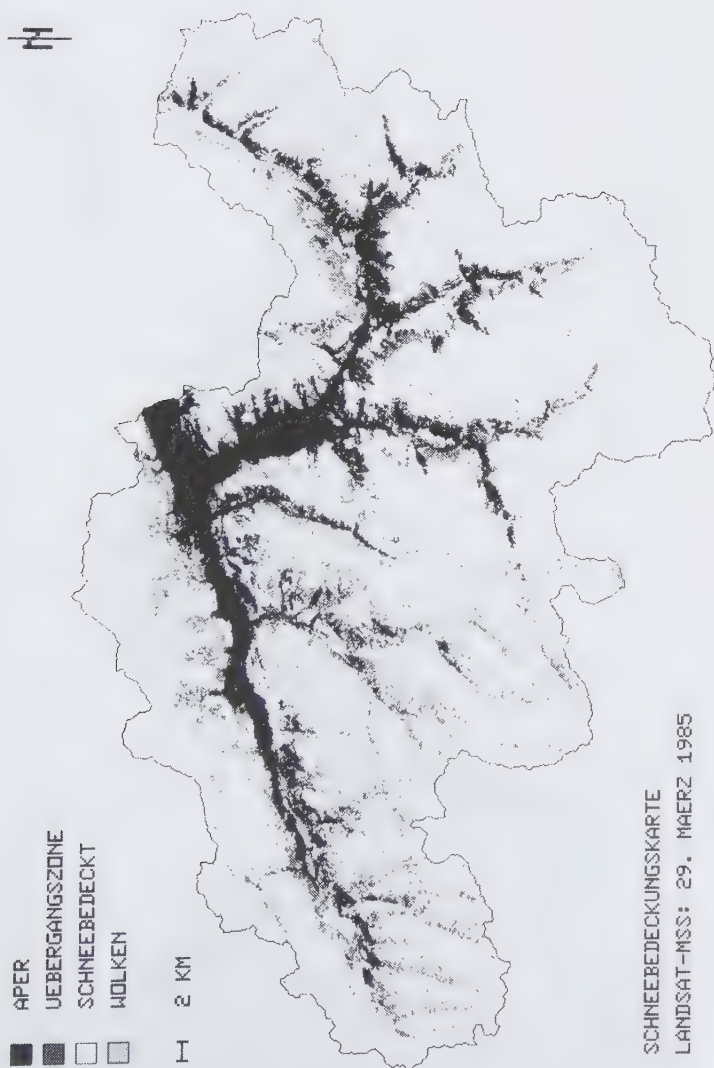


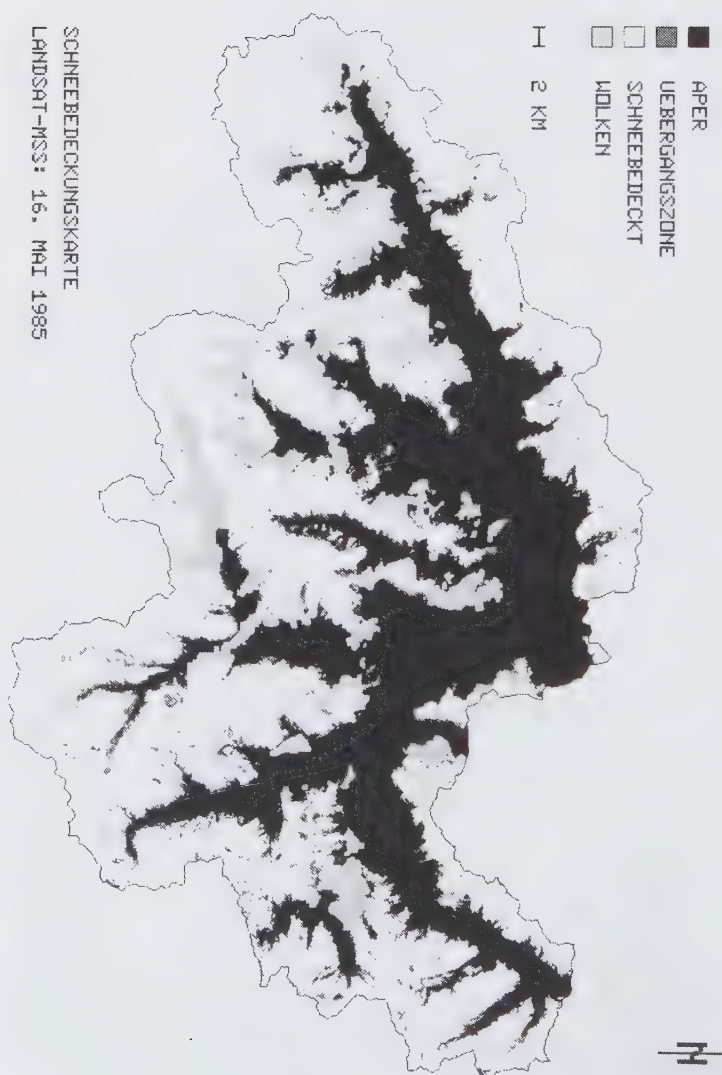
- APER
- UEBERGANGSZONE
- SCHNEEBEDECKT
- WOLKEN
- KEINE DATEN
- 2 KM
- 1

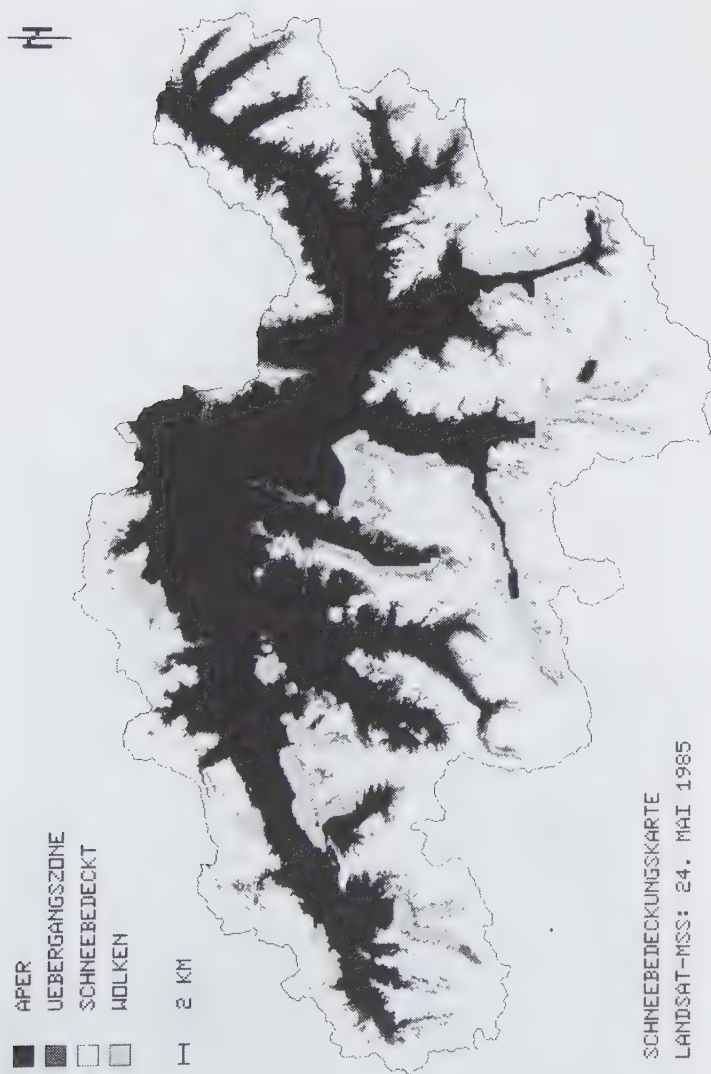


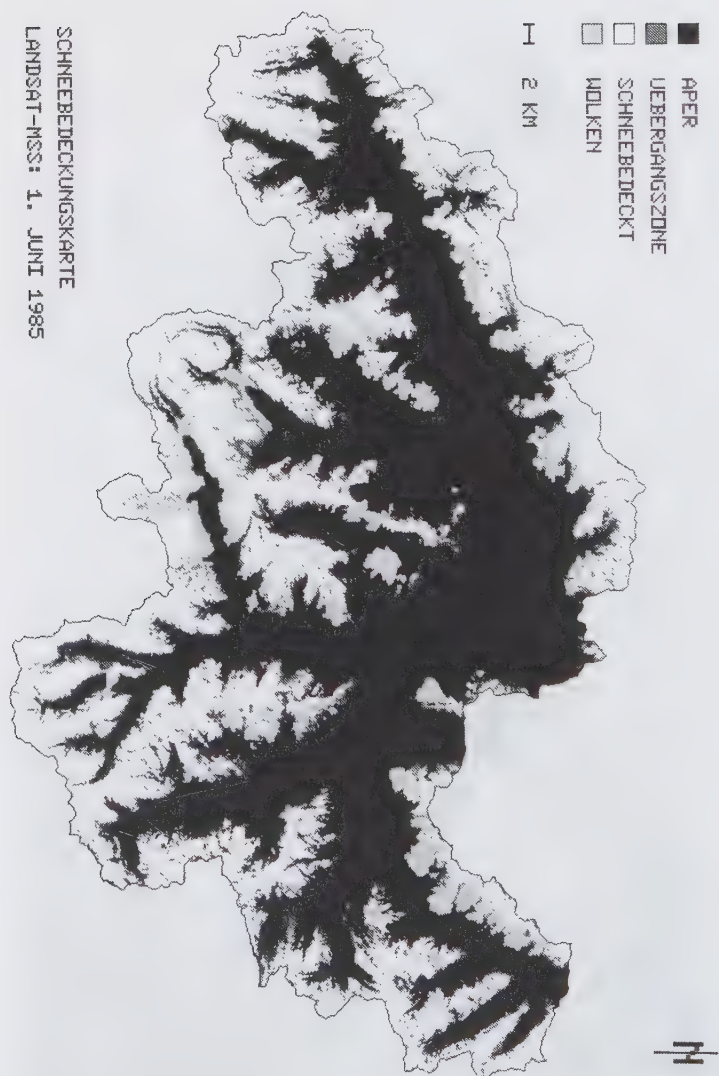
SCHNEEBEDECKUNGSKARTE
LANDSAT-MSS: 29. JULI 1982

Schneebedeckungskarten 1985





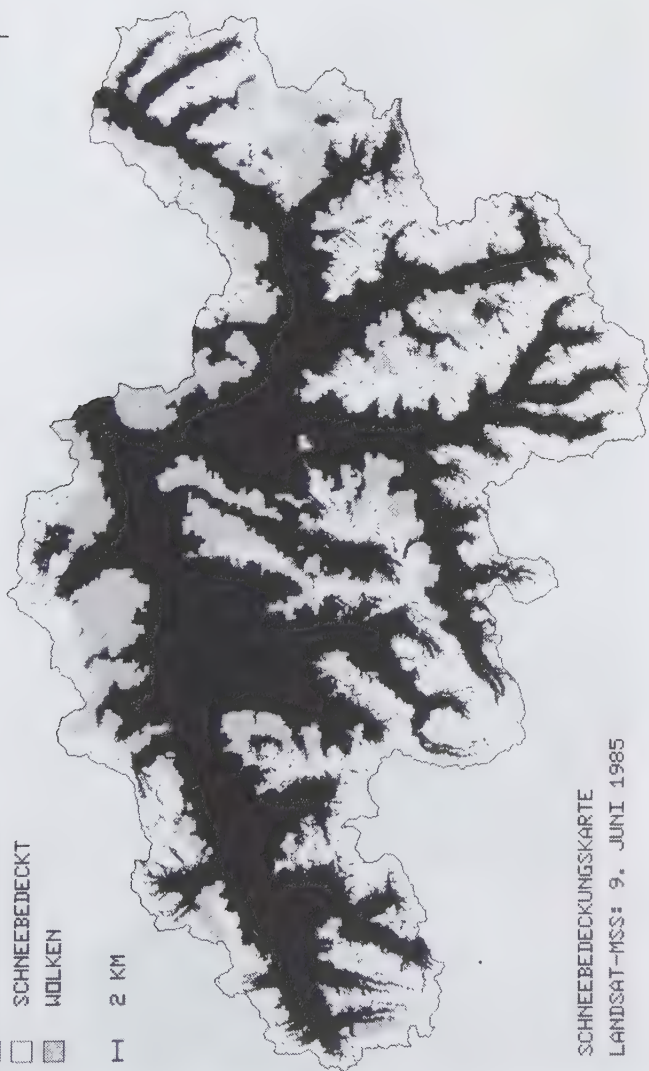






- APER
- UEBERGANGSZONE
- SCHNEEBEDECKT
- ▨ WOLKEN

1 2 KM



SCHNEEBEDECKUNGSKARTE
LANDSAT-MSS: 9. JUNI 1985



ANHANG II:

Modelleingaben für das Snowmelt Runoff Model (SRM):

Variable	Symbol	Beschreibung
ND	n	Anzahl Schneeschmelz-Tage
T	T	Temperature in Grad-Tagen
S	S	Rel. Schneebedeckung pro Zone
ACTUAL	Q	Natürlicher Abfluss
PRECIP	P	Niederschläge
TMAX		Tägliches Temperaturmaximum
TMIN		Tägliches Temperaturminimum
TCRIT	T_{crit}	Kritische Temperatur

Parameter	Symbol	Beschreibung
BASIN		Name des Einzugsgebietes
NZ		Anzahl Höhenzonen
IYEAR		Simulations- oder Prognosejahr
AREA	A	Fläche pro Höhenzone
X	x	X-Parameter zur Berechnung des Rezessionskoeffizienten k
Y	y	Y-Parameter zur Berechnung des Rezessionskoeffizienten k
QNS		Abfluss-Startwert
PDR		Prozentualer Anteil des Abflusses vom Vortag
PDM2		Prozentualer Anteil des Abflusses, wenn mehr als 24 Stunden Verzögerung
DTLR	δ	Mittlerer Temperaturgradient in Grad-Tagen
AN	α	Grad-Tag-Faktoren
CS	c_s	Abflusskoeffizient infolge Schneeschmelze
CR	c_r	Abflusskoeffizient infolge von Regenfällen
ZMEAN	$\bar{h}$	Mittlere hypsographische Höhe pro Zone
STATN	h_{st}	Höhe der meteorologischen Station
IPR		Niederschlagsmethode (zonal und saisonal variierend)
MAXMIN		Eingabe der Temperaturen als Maximum/ Minimum (nein/ja)
IEXT		Temperaturen werden automatisch auf Zonenhöhe extrapoliert (nein/ja)
IDEGDY		Umrechnung der Temperaturen in Grad- Tage (nein/ja)

Optionen	Default	Beschreibung
IRUN	1	Anzahl Modelldurchgänge
MODE	0	Simulation/Prognose (0/1)
IPLT	0	Graphischer Output (nein/ja)
IPRINT	0	Gedruckter Output (nein/ja)
UFLAG	0	Einheiten (metrisch/englisch)
ACTFLAG	1	Vergleich mit gemessenem Abfluss(nein/ja)
IZONE	1,1,1	Temperatur, Niederschlag und Abflusskoeffizient: Zonale Eingabe (nein/ja)
IDTFLAG	0	Temperaturgradient vorhanden (nein/ja)
MTHFD	0	Berechnung der Grad-Tage mit Mittelwert- Methode (nein/ja)

ITPROC	0	Temperatur-Verarbeitung: Extrapolation und Grad-Tag-Berechnung (nein/ja)
IPRRUN	1	Gedruckter Output der Abflussberechnungen (nein/ja)
ISTMTH	4	Start-Monat der Berechnungen
IENMTH	9	End-Monat der Berechnung

ANHANG III:

Modellinputdaten für die Ausaperungsperiode 1982

```
&CLIM
ND=183,
S=.1621, .1574, .1529, .1477, .1420, .1366, .1320, .1285, .1248,
.1199, .1149, .1116, .1071, .1018, .0969, .0929, .0898, .0871,
.0839, .0797, .0754, .0714, .0677, .0640, .0604, .0570, .0539,
.0510, .0484, .0458, .0431, .0404, .0377, .0351, .0326, .0304, .0282, .0262, .0243,
.0226, .0214, .0205, .0197, .0188, .0178, .0166, .0153, .0137,
.0103, .0083, .0072, .0058, .0040, .0020, .0003, .0.00, .0.00,
.0.00, .0.00, .0.00, .0.00,
30*0.0, 31*0.0, 31*0.0, 30*0.0, 31*0.0, 30*0.0, 31*0.0, 31*0.0,
28*0.0, 31*0.0, .0.0,
.3752, .3675, .3594, .3505, .3410, .3310, .3219, .3144, .3071,
.2998, .2919, .2825, .2732, .2659, .2589, .2510, .2436, .2378,
.2307, .2219, .2135, .2060, .1994, .1932, .1871, .1810, .1751,
.1689, .1624, .1558, .1497, .1443, .1397, .1356, .1310, .1254, .1193, .1134, .1079,
.1030, .0988, .0952, .0919, .0887, .0853, .0817, .0780, .0744,
.0708, .0667, .0618, .0580, .0546, .0507, .0472, .0444, .0401,
.0371, .0338, .0353, .0312, .0220, .0193, .0181, .0172, .0159, .0147,
.0300, .0284, .0255, .0112, .0103, .0094, .0084, .0069, .0051,
.00137, .00129, .00121, .00112, .00103, .00094, .00084, .00069, .00051,
.00032, .00016, .00006, .00001, .0.00, .0.00, .0.00, .0.00, .0.00,
.0.00, .0.00, .0.00, .0.00,
31*0.0, 31*0.0, 30*0.0, 31*0.0, 30*0.0, 31*0.0, 31*0.0, 28*0.0,
31*0.0, .0.0,
.7048, .7010, .6976, .6942, .6905, .6868, .6834, .6803, .6776,
.6750, .6724, .6695, .6665, .6635, .6603, .6570, .6535, .6500,
.6472, .6454, .6436, .6410, .6376, .6342, .6312, .6284, .6258,
.6231, .6204, .6176, .6150, .6119, .6068, .6000, .5933, .5878, .5828, .5776, .5714,
.5640, .5560, .5481, .5413, .5356, .5291, .5192, .5074, .4977,
.4867, .4655, .4537, .4338, .4085, .3923, .3596, .3341, .3011,
.2687, .2496, .2270, .1984, .1862, .1751, .1658, .1560, .1462, .1370, .1305, .1252, .1195,
.1129, .1063, .1009, .0963, .0913, .0867, .0828, .0793, .0758,
.0720, .0680, .0649, .0629, .0610, .0584, .0550, .0514, .0476,
.0431, .0388, .0371, .0369, .0338, .0298, .0271, .0249, .0223, .0194, .0168, .0147,
.0131, .0121, .0108, .0084, .0076, .0047, .0019, .0004, .0.00,
.0.00, .0.00, .0.00, .0.00, .0.00, .0.00, .0.00, .0.00, .0.00,
.0.00, .0.00, .0.00, .0.00,
31*0.0, 30*0.0, 31*0.0, 30*0.0, 31*0.0, 31*0.0, 28*0.0, 31*0.0, .0.0,
.9578, .9578, .9581, .9585, .9591, .9597, .9602, .9606, .9609,
.9609, .9606, .9601, .9594, .9586, .9578, .9573, .9570, .9570,
.9573, .9579, .9587, .9595, .9601, .9603, .9598, .9588, .9574,
.9560, .9552, .9553, .9552, .9544, .9533, .9523, .9515, .9506, .9495, .9478, .9456,
.9552, .9544, .9399, .9368, .9340, .9330, .9306, .9267, .9238,
.9203, .9152, .9079, .9026, .8964, .8880, .8811, .8738, .8654,
.8521, .8351, .8222, .8028, .7876, .7671, .7526, .7348, .7068, .6899, .6699, .6458, .6193,
.5998, .5823, .5614, .5365, .5155, .4882, .4625, .4443, .4055,
.3879, .3689, .3463, .3240, .3063, .2910, .2644, .2463, .2318,
.2159, .2022, .1881, .1786, .1657, .1535, .1459, .1383, .1301, .1220, .1128, .1035,
.0975, .0899, .0853, .0865, .0817, .0765, .0727, .0701, .0682,
.0659, .0631, .0598, .0565, .0538, .0522, .0521, .0524, .0513,
```

.0488	.0467	.0452	.0430						
.0402	.0374	.0354	.0347	.0351	.0352	.0331	.0296	.0269	
.0251	.0240	.0232	.0223	.0211	.0201	.0199	.0196	.0181	
.0164	.0151	.0139	.0128	.0119	.0113	.0105	.0095	.0083	
.0070	.0054	.0039	.0025						
.0012	.0003	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	
.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	
.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	
.0000	.0000	.0000	.0000						
31*0.0	30*0.0	31*0.0	31*0.0	28*0.0	31*0.0	.00.0			
.9603	.9603	.9603	.9603	.9603	.9603	.9602	.9603	.9604	
.9606	.9605	.9601	.9594	.9585	.9578	.9575	.9576	.9577	
.9578	.9577	.9576	.9576	.9580	.9588	.9598	.9604	.9607	
.9607	.9605	.9603							
.9602	.9602	.9603	.9603	.9603	.9603	.9603	.9603	.9603	
.9603	.9603	.9603	.9603	.9603	.9603	.9603	.9603	.9602	
.9575	.9579	.9582	.9571	.9553	.9534	.9517	.9505	.9494	
.9480	.9460	.9423	.9367						
.9313	.9267	.9212	.9161	.9105	.9018	.8961	.8861	.8776	
.8692	.8566	.8440	.8308	.8170	.8002	.7807	.7612	.7412	
.7072	.6820	.6589	.6293	.6097	.5800	.5536	.5362	.5178	
.4995	.4815	.4684							
.4527	.4383	.4267	.4167	.4002	.4001	.3907	.3806	.3710	
.3625	.3547	.3477	.3417	.3362	.3304	.3242	.3180	.3119	
.3064	.3017	.2976	.2941	.2908	.2875	.2844	.2813	.2785	
.2760	.2736	.2710	.2681						
.2652	.2626	.2604	.2583	.2562	.2540	.2519	.2507	.2499	
.2462	.2440	.2432	.2434	.2434	.2421	.2399	.2383	.2382	
.2381	.2362	.2337	.2319	.2310	.2308	.2308	.2307	.2297	
.2280	.2263	.2252	.2246						
.2241	.2232	.2218	.2208	.2208	.2206	.2198	.2178	.2160	
.2152	.2152	.2140	.2147	.2146	.2146	.2145	.2144	.2144	
.2143	.2143	.2143	.2142	.2142	.2141	.2141	.2140	.2136	
.2132	.2131	.2131							
31*0.0	30*0.0	31*0.0	31*0.0	28*0.0	31*0.0	.00.0			
ACTUAL=	56.0	62.0	64.0	61.0	75.0	92.0	104.0	108.0	108.0
	91.0	85.0	79.0	69.0	66.0	67.0	77.0	71.0	
	69.0	81.0	75.0	74.0	69.0	77.0	64.0	66.0	71.0
	70.0	70.0	73.0						
	68.0	65.0	68.0	82.0	92.0	97.0	113.0	95.0	92.0
	86.0	98.0	97.0	114.0	133.0	165.0	200.0	237.0	239.0
	262.0	273.0	281.0	273.0	319.0	307.0	225.0	229.0	274.0
	294.0	317.0	356.0	375.0					
	373.0	386.0	390.0	399.0	414.0	420.0	398.0	396.0	414.0
	393.0	436.0	536.0	378.0	269.0	219.0	195.0	288.0	307.0
	297.0	280.0	276.0	283.0	561.0	422.0	355.0	421.0	497.0
	313.0	290.0	272.0						
	252.0	258.0	299.0	315.0	262.0	263.0	292.0	254.0	234.0
	237.0	228.0	212.0	206.0	200.0	193.0	188.0	208.0	183.0
	167.0	159.0	155.0	161.0	150.0	191.0	147.0	137.0	133.0
	146.0	134.0	130.0	130.0					
	167.0	150.0	220.0	167.0	147.0	189.0	172.0	155.0	136.0
	130.0	131.0	130.0	130.0	138.0	140.0	128.0	144.0	126.0
	114.0	164.0	153.0	105.0	100.0	91.0	91.0	90.0	140.0
	297.0	279.0	179.0	241.0					
	263.0	221.0	200.0	180.0	173.0	536.0	662.0	382.0	290.0
	228.0	204.0	175.0	153.0	154.0	139.0	135.0	125.0	136.0
	109.0	107.0	122.0	115.0	116.0	96.0	105.0	281.0	521.0

211.0,	151.0,	152.0,							
179.0,	118.0,	86.4,	134.0,	139.0,	152.0,	145.0,	131.0,		
95.6,	79.0,	130.0,	121.0,	121.0,	127.0,	125.0,	90.6,		
73.3,	120.0,	118.0,	116.0,	96.7,	122.0,	101.0,	72.7,		
128.0,	129.0,	128.0,	126.0,	121.0,	77.9,	63.2,			
74.6,	92.5,	90.7,	90.3,	04.6,	60.3,	60.0,	70.1,	91.1,	
86.2,	73.7,	75.0,	56.3,	51.2,	87.9,	93.3,	78.9,	86.3,	
82.6,	49.3,	43.6,	94.6,	91.2,	78.2,	89.6,	96.8,	58.3,	
43.1,	91.8,	92.9,							
94.6,	89.4,	90.4,	51.5,	41.1,	85.7,	84.1,	62.1,	74.3,	
70.0,	47.4,	43.1,	70.1,	71.3,	77.7,	68.1,	67.8,	48.0,	
37.7,	75.9,	72.3,	70.7,	59.6,	61.0,	49.4,	36.8,	58.0,	
61.7,	62.9,	59.2,	72.7,						
45.8,	39.0,	36.1,	69.0,	67.7,	73.5,	82.0,	89.6,	53.5,	
40.4,	79.4,	81.8,	84.5,	91.3,	90.7,	59.2,	40.6,	84.5,	
90.6,	93.5,	94.8,	92.1,	51.2,	39.4,	80.0,	62.8,	79.8,	
81.4,	91.3,	49.5,	33.6,						
84.0,	87.6,	92.9,	93.9,	92.8,	53.2,	35.0,	86.3,	90.1,	
90.9,	95.2,	97.9,	52.2,	38.8,	94.7,	104.0,	109.0,	108.0,	
105.0,	57.5,	36.8,	85.9,	91.5,	104.0,	103.0,	104.0,	57.9,	
43.8,									
86.4,	98.4,	100.0,	103.0,	92.3,	55.6,	42.2,	88.0,	97.6,	
96.1,	102.0,	101.0,	53.2,	39.4,	73.1,	80.3,	79.8,	88.2,	
86.1,	54.8,	35.8,	87.7,	93.5,	98.0,	80.9,	80.2,	47.7,	
34.0,	79.0,	87.5,	98.7,						
PRECIP=	0.000,	0.070,	0.027,	0.000,	0.000,	0.000,	0.070,		
	0.043,	0.497,	0.005,	0.000,	0.045,	0.022,			
	0.035,	0.000,	0.000,	0.000,	0.000,	0.030,			
	0.000,	0.028,	0.003,	0.015,	0.090,	0.100,			
	0.003,	0.010,	0.015,	0.028,	0.572,	0.010,			
	0.005,	0.000,	0.017,	0.618,	1.667,	3.022,			
	0.007,	1.397,	0.370,	0.048,	0.000,	0.012,			
	0.000,	0.000,	0.110,	0.000,	0.000,	0.133,			
	0.017,	0.433,	0.015,	0.758,	1.162,	0.217,			
	0.000,	0.000,	0.002,	0.290,	0.000,	0.010,			
	0.017,								
	0.000,	0.000,	0.007,	0.000,	0.350,	0.133,			
	0.043,	0.450,	0.037,	0.090,	2.937,	2.040,			
	1.142,	0.172,	0.005,	2.205,	0.030,	0.372,			
	0.000,	0.000,	0.288,	1.477,	2.173,	0.000,			
	0.383,	3.427,	0.352,	0.423,	0.070,	0.000,			
	0.000,	0.088,	0.115,	0.537,	0.000,	0.280,			
	0.000,	0.000,	0.000,	0.000,	0.000,	0.000,			
	0.158,	0.228,	0.065,	0.953,	0.175,	0.038,			
	0.130,	0.012,	0.695,	0.420,	2.463,	0.313,			
	0.263,	0.217,	0.648,	0.998,	0.002,	0.675,			
	0.927,								
	0.000,	1.443,	0.252,	0.240,	0.670,	1.225,			
	0.198,	0.038,	0.000,	0.000,	0.000,	0.000,			
	0.773,	0.000,	0.648,	0.843,	0.130,	0.000,			
	0.018,	1.638,	0.005,	0.000,	0.175,	0.310,			
	0.063,	0.362,	1.253,	3.470,	0.002,	0.092,			
	4.430,								
	0.000,	0.000,	0.000,	0.000,	0.972,	4.100,			
	0.197,	0.002,	0.000,	0.000,	0.000,	0.000,			
	0.000,	0.000,	0.000,	0.000,	0.000,	0.002,			

TMAX =

0.000, 0.105,	0.028, 4.527,	0.030, 0.017,	0.047, 0.000,	0.613, 0.000,	0.035, 1.020,
0.038, 0.013, 0.715, 0.115, 0.000, 0.000, 0.000, 0.045, 1.522, 0.002, 0.072,	0.000, 0.072, 0.122, 0.000, 0.000, 0.000, 1.208, 0.022, 0.000, 0.250,	0.177, 0.000, 0.150, 0.000, 0.000, 0.000, 2.103, 0.468, 0.000, 0.238,	0.277, 0.038, 0.000, 0.747, 0.000, 0.000, 0.000, 0.007, 0.308, 0.000, 0.313,	0.782, 0.343, 0.125, 0.797, 0.000, 0.000, 0.000, 0.457, 1.347, 0.000, 0.002,	2.327, 0.002, 0.102, 0.270, 0.000, 0.000, 0.000, 0.502, 0.650, 0.052, 0.000,
0.000, 0.037, 0.003, 0.000, 0.010, 0.000, 0.380, 0.090, 0.000, 0.000, 0.000, 0.418, 0.002, 0.000, 0.000, 0.163, 0.032, 0.073, 0.040, 0.410, 0.070, 0.000, 0.222, 8.983, 9.733, -1.150, 7.017, 4.000,	0.000, 0.778, 0.005, 0.192, 0.000, 0.000, 0.020, 0.778, 0.000, 0.000, 0.000, 0.000, 0.000, 0.000, 0.065, 0.002, 0.078, 0.000, 0.575, 0.028, 0.000, 0.080, 0.000, 0.000, 0.617, 11.983, -0.083, 3.183, 6.917,	0.000, 0.135, 0.348, 0.255, 0.017, 0.000, 0.502, 0.000, 0.000, 0.218, 0.000, 0.003, 0.002, 0.040, 0.027, 4.767, 3.083, 5.267, 4.433, 4.333,	0.000, 0.763, 0.530, 0.000, 0.387, 0.052, 0.107, 0.000, 0.000, 0.037, 0.000, 0.000, 0.013, 0.032, 0.002, 0.448, 0.443, 0.000, 0.102, 0.020,	0.000, 0.457, 2.005, 0.022, 0.143, 1.742, 0.000, 0.000, 0.163, 5.065,	0.005, 0.113, 0.172, 0.000, 0.000, 1.197, 0.338, 0.000, 0.012, 0.590, 0.005, 0.000, 0.007, 0.047, 0.000, 0.305, 0.425, 0.002, 0.525,
6.483, 3.917, 12.833, 15.417, 14.633, 18.117, 20.317, 18.683, 7.167, 14.717, 19.500,	8.183, 5.050, 14.867, 14.567, 17.767, 20.183, 19.450, 6.800, 17.883, 15.767,	9.667, 6.583, 15.883, 12.400, 18.017, 20.967, 19.017, 10.367, 15.717, 10.367,	9.117, 7.500, 16.500, 14.800, 15.650, 20.500, 20.017, 11.633, 20.067, 15.233,	7.783, 10.017, 13.883, 13.717, 15.483, 20.183, 14.433, 16.683, 12.150, 14.367,	7.517, 12.950, 16.000, 6.783, 18.067, 18.017, 9.650, 16.350, 18.883, 14.733,
18.117, 19.767,	21.867, 22.050,	21.867, 24.467,	16.000, 23.083,	20.250, 23.783,	22.800, 23.133,

23.000,	23.550,	23.500,	24.283,	19.633,	19.883,
20.467,	21.500,	21.483,	19.217,	18.233,	13.000,
11.317,	11.450,	10.983,	9.233,	19.100,	21.000,
13.867,					
20.417,	19.783,	14.700,	15.700,	17.600,	14.033,
13.683,	14.333,	15.283,	18.217,	21.717,	23.317,
22.633,	19.233,	22.583,	20.483,	14.217,	20.267,
18.933,	12.517,	10.000,	14.050,	17.183,	14.650,
13.383,	17.100,	13.017,	10.317,	14.450,	17.267,
10.500,					
12.550,	16.600,	18.867,	23.033,	22.217,	12.867,
8.950,	11.733,	16.883,	19.150,	19.400,	19.017,
18.517,	19.933,	20.283,	20.267,	18.850,	18.233,
18.817,	20.050,	14.683,	14.483,	10.250,	11.083,
15.017,	16.850,	14.133,	13.433,	15.783,	11.650,
9.683,	12.750,	13.567,	10.950,	5.833,	3.817,
6.217,	7.217,	4.900,	6.350,	9.250,	7.200,
11.033,	10.950,	4.317,	6.783,	7.883,	10.350,
9.833,	13.517,	14.150,	10.800,	7.950,	5.267,
5.217,	8.683,	10.183,	11.000,	12.267,	12.633,
12.350,					
13.450,	11.750,	12.133,	8.883,	8.017,	7.867,
7.017,	8.817,	6.433,	6.550,	7.900,	9.350,
6.350,	0.267,	-1.700,	-1.400,	-2.467,	0.500,
3.433,	2.400,	5.967,	6.567,	6.733,	6.667,
6.683,	5.883,	6.317,	1.417,	-0.317,	1.967,
3.200,	5.267,	4.383,	4.900,	5.100,	5.117,
5.650,	7.500,	4.733,	6.317,	-2.700,	-2.033,
-1.583,	-2.417,	2.117,	4.850,	5.950,	-1.567,
-3.333,	2.800,	0.483,	-5.267,	-6.717,	-4.833,
-2.567,	-0.717,	0.250,	0.417,	-3.667,	-3.017,
1.733,					
1.367,	1.433,	7.183,	5.733,	2.800,	0.633,
-6.267,	-0.833,	3.383,	1.433,	2.333,	1.150,
0.417,	2.550,	5.617,	5.500,	5.283,	3.733,
2.783,	2.017,	1.100,	-0.450,	-2.800,	-3.900,
-3.833,	0.617,	-1.333,	-2.667,	-2.633,	1.383,
0.683,					
-0.250,	0.050,	0.100,	1.733,	3.250,	2.633,
4.600,	3.867,	1.567,	7.800,	7.200,	5.517,
5.300,	2.567,	0.200,	2.383,	5.033,	5.567,
0.267,	1.117,	-1.617,	-4.217,	-7.183,	-5.833,
-6.150,	-6.333,	0.217,	4.650,		
6.950,	0.700,	4.433,	4.067,	-1.383,	-3.783,
1.067,	1.850,	2.267,	1.700,	-1.117,	0.850,
-1.667,	-1.033,	4.617,	4.117,	3.483,	-2.083,
-0.533,	0.867,	-0.017,	-0.417,	-1.067,	3.133,
6.250,	8.000,	9.450,	6.317,	6.483,	4.833,
4.883,	0.000,				
-3.450,	-0.033,	-0.083,	-0.367,	2.283,	2.883,
1.567,	0.483,	-3.600,	-4.167,	-4.583,	-3.200,
-5.017,	-6.667,	-5.100,	-1.583,	-1.233,	-2.917,
-3.700,	-4.483,	-3.967,	-4.083,	-4.033,	-3.600,
-4.667,	-4.183,	-1.083,	-3.567,	-1.217,	-4.617,
-5.450,	-1.333,	0.417,	2.967,	0.667,	-2.500,

TMIN =

-4.017,	-2.867,	-0.450,	-0.350,	-2.017,	0.717,
1.383,	2.133,	3.733,	5.567,	6.083,	5.317,
6.317,	6.433,	5.267,	4.767,	5.533,	2.483,
0.633,	4.933,	6.117,	6.433,	6.417,	6.533,
8.783,					
7.533,	8.817,	8.367,	8.933,	8.133,	7.383,
8.150,	7.200,	7.767,	8.233,	7.167,	4.483,
2.817,	2.517,	2.717,	3.100,	7.633,	7.700,
5.833,	7.250,	9.150,	8.833,	7.750,	6.650,
10.167,	8.633,	5.500,	5.000,	7.217,	5.583,
4.767,	8.317,	11.900,	6.833,	6.850,	9.700,
9.800,	8.867,	10.683,	12.300,	11.833,	10.617,
10.783,	11.300,	11.567,	10.150,	10.083,	8.617,
9.233,	10.367,	10.217,	9.333,	9.567,	8.500,
8.300,	8.533,	7.433,	5.883,	5.950,	10.333,
8.050,					
7.117,	10.200,	8.683,	8.933,	10.267,	8.750,
8.133,	8.550,	8.850,	8.883,	8.617,	11.333,
10.633,	9.917,	10.033,	10.250,	8.617,	7.183,
9.250,	5.817,	3.167,	2.550,	4.817,	6.400,
5.100,	8.650,	9.150,	7.733,	7.500,	6.267,
2.183,					
2.283,	4.550,	6.067,	9.617,	11.267,	6.767,
5.117,	7.400,	7.133,	8.200,	8.817,	7.583,
7.717,	8.333,	9.200,	8.933,	9.033,	8.183,
7.900,	8.967,	9.800,	8.033,	4.517,	2.883,
7.817,	7.833,	4.450,	4.517,	4.400,	5.300,
3.800,	3.533,	3.467,	5.750,	2.567,	-1.150,
-1.350,	-0.783,	0.217,	-0.050,	-0.500,	0.517,
2.833,	2.383,	0.033,	-1.983,	1.167,	3.233,
4.150,	2.617,	3.050,	4.100,	4.050,	2.600,
1.250,	-0.550,	-0.383,	1.000,	1.867,	2.600,
2.350,					
2.067,	3.483,	2.217,	0.333,	-1.233,	-0.667,
-0.367,	3.767,	2.500,	1.600,	0.250,	1.517,
0.217,	-5.083,	-5.767,	-6.250,	-5.933,	-4.917,
-3.017,	-4.583,	-4.200,	-0.683,	-0.500,	0.317,
-0.183,	0.800,	1.650,	-1.483,	-2.200,	-3.167,
-2.933,	-1.800,	-0.350,	-2.500,	-2.667,	-0.450,
-0.067,	-1.700,	-0.167,	-2.433,	-7.083,	-7.583,
-6.433,	-7.833,	-8.667,	-1.733,	-0.200,	-8.133,
-11.917,	-8.350,	-8.283,	-11.150,	-10.867,	-11.250,
-11.050,	-7.717,	-6.517,	-6.017,	-11.433,	-12.417,
-7.067,					
-2.467,	-6.017,	-3.233,	-0.900,	-1.483,	-3.933,
-13.500,	-12.767,	-3.083,	-2.883,	-2.150,	-3.533,
-5.350,	-4.700,	-0.550,	-1.150,	-3.400,	-4.583,
-4.683,	-5.417,	-6.983,	-6.967,	-7.433,	-8.117,
-10.667,	-11.017,	-5.150,	-6.583,	-6.650,	-3.867,
-3.367,					
-7.667,	-9.867,	-10.867,	-9.467,	-7.550,	-5.700,
-3.067,	-4.117,	-5.300,	-3.983,	-2.050,	-4.017,
-2.317,	-5.400,	-4.150,	-4.517,	-0.950,	-3.583,
-4.183,	-5.583,	-9.450,	-12.583,	-11.483,	-13.733,
-15.500,	-13.967,	-13.583,	-8.167,		

```

-3.567, -4.967, -6.933, -4.183, -6.233, -9.883,
-10.567, -4.567, -5.617, -7.000, -6.883, -9.033,
-6.850, -10.617, -10.000, -4.617, -4.067, -5.033,
-7.433, -7.117, -6.950, -4.800, -5.283, -9.000,
-7.150, -3.783, -1.500, -0.033, -2.850, -1.500,
-1.750, 0.000,
TCRIT=30*3.0, 31*3.0, 15*3.0, 15*2.0, 31*0.75, 31*0.75, 30*0.75, 183*3.0,

```

&END

&BASE

```

BASIN = 'FELSBERG VR/HR/LW-AL ',
NZ=5,
IYEAR=1982,
AREA=2.6217E8, 5.2349E8, 8.9156E8, 1.16009E9, 4.3516E8,
X=1.0700,
Y=-0.02900,
QNS=50.000,
PDR=367*1.0,
PDM2=367*0.0,
DTLR=2928*0.65,
AN=30*0.45, 31*0.5, 30*0.55, 31*0.55, 31*0.55, 30*0.55, 123*0.25,
59*0.3, 0.0,
30*0.45, 31*0.5, 30*0.55, 31*0.55, 31*0.55, 30*0.55, 123*0.25,
59*0.3, 0.0,
30*0.4, 31*0.45, 30*0.5, 31*0.55, 31*0.55, 30*0.6, 123*0.25,
59*0.3, 0.0,
30*0.4, 31*0.45, 30*0.5, 31*0.55, 31*0.55, 30*0.6, 123*0.25,
59*0.3, 0.0,
30*0.4, 31*0.45, 30*0.5, 31*0.55, 31*0.55, 30*0.6, 123*0.25,
59*0.3, 0.0,
CS=30*0.8, 31*0.7, 30*0.7, 31*0.7, 31*0.7, 30*0.8, 123*0.8,
59*0.8, 0.0,
30*0.8, 31*0.7, 30*0.7, 31*0.7, 31*0.7, 30*0.8, 123*0.8,
59*0.8, 0.0,
30*0.9, 15*0.9, 16*0.8, 30*0.8, 31*0.8, 31*0.8, 30*0.8, 123*0.9,
59*0.9, 0.0,
30*0.9, 15*0.9, 16*0.8, 30*0.8, 31*0.8, 31*0.8, 30*0.8, 123*0.9,
59*0.9, 0.0,
30*0.9, 15*0.9, 16*0.8, 30*0.8, 31*0.8, 31*0.8, 30*0.8, 123*0.9,
59*0.9, 0.0,
CR=30*0.9, 31*0.6, 30*0.6, 31*0.6, 31*0.6, 30*0.6, 123*0.5,
59*0.6, 0.0,
30*0.9, 31*0.6, 30*0.6, 31*0.6, 31*0.6, 30*0.6, 123*0.5,
59*0.6, 0.0,
30*0.9, 31*0.9, 15*0.9, 15*0.6, 31*0.6, 31*0.6, 30*0.6, 123*0.5,
59*0.6, 0.0,
30*0.9, 31*0.9, 15*0.9, 15*0.6, 31*0.6, 31*0.6, 30*0.6, 123*0.5,
59*0.6, 0.0,
30*0.9, 31*0.9, 15*0.9, 15*0.6, 31*0.6, 31*0.6, 30*0.6, 123*0.5,
59*0.6, 0.0,
ZMEAN=900., 1400., 1880., 2360., 2750.,
STATN=1523.,
MAXMIN=1,
TEXT=1,
IDEGDY=1,
IPR=30*0, 31*1, 30*1, 31*1, 31*1, 30*1, 123*0, 60*0,
30*0, 31*1, 30*1, 31*1, 31*1, 30*1, 123*0, 60*0,
30*0, 31*0, 15*0, 15*1, 31*1, 31*1, 30*1, 123*0, 60*0,
30*0, 31*0, 15*0, 15*1, 31*1, 31*1, 30*1, 123*0, 60*0,
30*0, 31*0, 15*0, 15*1, 31*1, 31*1, 30*1, 123*0, 60*0,

```

&END

&OPT

```

IRUN=1,
MODE=0,
IPLT=0,
IPRINT=1,
UFLAG=0,
ACTFLG=1,
IZONE=0,0,1,
IDTFLG=1,
MTHD=0,
ITPROC=1,
IPRRUN=1,
ISTMTH=4,
IENMTH=9,

```

&END

ANHANG IV:

Modellinputdaten für die Ausaperungsperiode 1985

```
&CLIM
ND=183,
S=.21, .20, .19, .18, .18, .17, .16, .15, .14, .14, .13, .12, .12, .11,
.10, .10, .10, .09, .09, .09, .08, .08, .07, .06, .05, .05, .04, .04,
.03, .03,
.03, .02, .02, .02, .01, .01, .01, .01, .00, .00, .00, .00, .00,
.00, .00, .00, .00, .00, .00, .00, .00, .00, .00, .00, .00,
.00, .00, .00,
30*.00, 31*.00, 31*.00, 30*.00, 31*.00, 30*.00, 31*.00, 31*.00,
28*.00, 31*.00, .00,
.63, .62, .60, .58, .56, .55, .53, .51, .48, .46, .44, .42, .40, .38,
.36, .34, .33, .32, .30, .29, .27, .25, .24, .23, .22, .20, .19, .18,
.17, .16,
.15, .14, .13, .12, .11, .10, .09, .08, .07, .06, .06, .05, .04, .04,
.03, .02, .02, .02, .01, .01, .01, .00, .00, .00, .00, .00, .00,
.00, .00, .00,
30*.00, 31*.00, 31*.00, 30*.00, 31*.00, 30*.00, 31*.00, 31*.00,
28*.00, 31*.00, .00,
.83, .82, .82, .81, .81, .80, .80, .79, .78, .78, .77, .76, .75, .75,
.74, .73, .73, .72, .71, .70, .69, .69, .68, .67, .66, .65, .65, .64,
.63, .62,
.61, .60, .60, .59, .58, .57, .56, .55, .54, .53, .52, .51, .50, .49,
.48, .47, .46, .44, .41, .39, .37, .35, .32, .29, .26, .24, .22, .20,
.17, .15, .13,
.12, .11, .11, .10, .09, .08, .07, .06, .06, .06, .05, .05, .05, .04,
.04, .03, .03, .02, .02, .02, .02, .01, .01, .01, .01, .00, .00,
.00, .00,
31*.00, 31*.00, 30*.00, 31*.00, 30*.00, 31*.00, 31*.00, 28*.00,
31*.00, .00,
.98, .98, .98, .98, .98, .98, .98, .98, .98, .98, .98, .98, .98,
.98, .98, .98, .98, .98, .98, .98, .98, .98, .98, .98, .98,
.98, .98,
.98, .98, .98, .98, .98, .98, .98, .98, .98, .98, .98, .98, .97,
.97, .96, .96, .95, .95, .94, .93, .92, .91, .90, .89, .88, .87, .86,
.85, .83, .81,
.79, .77, .75, .74, .72, .70, .68, .66, .64, .62, .60, .59, .58, .56,
.54, .53, .51, .50, .49, .47, .45, .44, .43, .42, .41, .40, .39, .38,
.36, .35,
.34, .33, .33, .32, .32, .30, .29, .27, .26, .25, .24, .23, .22, .21,
.20, .20, .19, .18, .17, .16, .15, .15, .14, .13, .13, .12, .11, .10,
.09, .09, .08,
.07, .06, .05, .05, .04, .03, .03, .03, .02, .02, .01, .01, .01, .01,
.00, .00, .00, .00, .00, .00, .00, .00, .00, .00, .00, .00,
.00, .00, .00,
30*.00, 31*.00, 30*.00, 31*.00, 31*.00, 28*.00, 31*.00, .00,
.98, .98, .98, .98, .98, .98, .98, .98, .98, .98, .98, .98, .98,
.98, .98, .98, .98, .98, .98, .98, .98, .98, .98, .98, .98,
.98, .98,
.98, .98, .98, .98, .98, .98, .98, .98, .98, .98, .98, .98, .98,
.98, .98, .98, .98, .98, .98, .98, .97, .97, .97, .96, .95,
.95, .94, .93,
.92, .91, .91, .90, .90, .89, .89, .89, .88, .88, .87, .87, .86, .86,
.85, .85, .84, .84, .83, .83, .82, .82, .81, .81, .80, .80, .79,
.78, .77,
.77, .76, .76, .75, .74, .72, .70, .67, .64, .62, .60, .58, .57, .55,
.54, .53, .51, .50, .49, .48, .47, .46, .45, .44, .43, .42, .41, .40,
.39, .38, .37,
.36, .35, .34, .34, .33, .32, .32, .31, .31, .30, .30, .29, .29, .28,
```

.28,	.27,	.27,	.26,	.26,	.25,	.25,	.25,	.25,	.25,	.24,	.24,	.24,	.24,
.24,	.24,	.23,											
.23,	.23,	.23,	.23,	.23,	.23,	.23,	.22,	.22,	.22,	.22,	.22,	.22,	.22,
.22,	.22,	.22,	.22,	.22,	.22,	.22,	.22,	.22,	.22,	.22,	.22,	.22,	.22,
.22,	.22,												
31*.00,	30*.00,	31*.00,	31*.00,	28*.00,	31*.00,	.00,							
ACTUAL=	27.0,	33.0,	39.0,	45.0,	53.0,	67.0,	55.0,	49.0,	56.0,				
	75.0,	61.0,	55.0,	50.0,	43.0,	51.0,	44.0,	47.0,	49.0,				
	50.0,	57.0,	71.0,	73.0,	67.0,	74.0,	71.0,	75.0,	78.0,				
	69.0,	66.0,	60.0,										
	62.0,	63.0,	72.0,	63.0,	56.0,	70.0,	92.0,	102.0,	80.0,				
	85.0,	85.0,	105.0,	173.0,	291.0,	240.0,	208.0,	224.0,	225.0,				
	194.0,	208.0,	212.0,	235.0,	188.0,	174.0,	192.0,	243.0,	318.0,				
	357.0,	327.0,	309.0,	323.0,									
	329.0,	325.0,	317.0,	327.0,	362.0,	372.0,	574.0,	467.0,	298.0,				
	219.0,	189.0,	163.0,	176.0,	192.0,	296.0,	222.0,	221.0,	173.0,				
	164.0,	171.0,	163.0,	175.0,	165.0,	156.0,	162.0,	182.0,	250.0,				
	231.0,	218.0,	236.0,										
	267.0,	304.0,	270.0,	316.0,	339.0,	354.0,	350.0,	324.0,	288.0,				
	268.0,	241.0,	245.0,	246.0,	267.0,	287.0,	300.0,	304.0,	258.0,				
	254.0,	239.0,	220.0,	181.0,	177.0,	160.0,	178.0,	185.0,	203.0,				
	193.0,	204.0,	355.0,	342.0,									
	192.0,	176.0,	163.0,	162.0,	177.0,	665.0,	335.0,	241.0,	208.0,				
	201.0,	190.0,	187.0,	177.0,	175.0,	163.0,	152.0,	145.0,	131.0,				
	125.0,	131.0,	124.0,	123.0,	127.0,	142.0,	542.0,	528.0,	250.0,				
	197.0,	177.0,	153.0,	147.0,									
	146.0,	139.0,	165.0,	172.0,	139.0,	148.0,	133.0,	115.0,	105.0,				
	101.0,	100.0,	91.0,	100.0,	102.0,	88.0,	116.0,	95.0,	92.0,				
	92.0,	90.0,	77.0,	74.0,	87.0,	77.0,	79.0,	72.0,	77.0,				
	73.0,	62.0,	68.0,										
	179.0,	118.0,	86.4,	134.0,	139.0,	152.0,	145.0,	131.0,	95.6,				
	79.0,	130.0,	121.0,	121.0,	127.0,	125.0,	90.6,	73.3,	120.0,				
	118.0,	116.0,	96.7,	122.0,	101.0,	72.7,	128.0,	129.0,	128.0,				
	126.0,	121.0,	77.9,	63.2,									
	74.6,	92.5,	90.7,	90.3,	84.6,	60.3,	60.0,	70.1,	91.1,				
	86.2,	73.7,	75.0,	56.3,	51.2,	87.9,	93.3,	78.9,	86.3,				
	82.6,	49.3,	43.6,	94.6,	91.2,	78.2,	89.6,	96.8,	58.3,				
	43.1,	91.8,	92.9,										
	94.6,	89.4,	90.4,	51.5,	41.1,	85.7,	84.1,	62.1,	74.3,				
	70.0,	47.4,	43.1,	70.1,	71.3,	77.7,	68.1,	67.8,	48.0,				
	37.7,	75.9,	72.3,	70.7,	59.6,	61.0,	49.4,	36.8,	58.0,				
	61.7,	62.9,	59.2,	72.7,									
	45.8,	39.0,	36.1,	69.0,	67.7,	73.5,	82.0,	89.6,	53.5,				
	40.4,	79.4,	81.8,	84.5,	91.3,	90.7,	59.2,	40.6,	84.5,				
	90.6,	93.5,	94.8,	92.1,	51.2,	39.4,	80.0,	82.8,	79.8,				
	81.4,	91.3,	49.5,	33.6,									
	84.0,	87.6,	92.9,	93.9,	92.8,	53.2,	35.0,	86.3,	90.1,				
	90.9,	95.2,	97.9,	52.2,	38.8,	94.7,	104.0,	109.0,	108.0,				
	105.0,	57.5,	36.8,	85.9,	91.5,	104.0,	103.0,	104.0,	57.9,				
	43.8,												
	86.4,	98.4,	100.0,	103.0,	92.3,	55.6,	42.2,	88.0,	97.6,				
	96.1,	102.0,	101.0,	53.2,	39.4,	73.1,	80.3,	79.8,	88.2,				
	86.1,	54.8,	35.8,	87.7,	93.5,	98.0,	80.9,	80.2,	47.7,				
	34.0,	79.0,	87.5,	98.7,									
PRECIP=	0.013,	0.000,	0.000,	0.000,	0.000,	0.247,	0.747,						
	0.218,	0.425,	3.312,	0.575,	0.747,								
	0.853,	0.102,	0.145,	0.677,	0.000,	0.000,	0.000,						
	0.000,	0.000,	0.000,	0.027,	0.355,	0.010,							

0.000,	0.000,	0.125,	0.368,	0.163,	0.827,
0.003,	0.615,	0.012,	0.040,	0.000,	0.308,
1.767,	0.397,	0.158,	0.060,	0.238,	1.442,
1.770,	0.012,	0.000,	0.000,	0.000,	0.003,
0.130,	0.902,	0.637,	0.643,	0.040,	0.000,
0.000,	0.030,	0.018,	0.850,	0.097,	0.308,
0.058,					
0.027,	0.000,	0.000,	0.093,	0.082,	1.652,
1.938,	0.687,	0.008,	0.600,	0.023,	0.347,
0.002,	1.075,	0.132,	1.183,	0.193,	0.002,
1.125,	0.122,	0.148,	1.100,	0.080,	0.328,
0.043,	0.888,	0.117,	0.002,	0.163,	0.200,
1.058,	0.135,	0.000,	0.002,	1.848,	0.887,
0.002,	0.003,	0.000,	0.003,	0.000,	0.000,
0.000,	0.152,	1.078,	1.613,	0.000,	0.000,
0.013,	0.673,	0.000,	0.000,	0.000,	0.000,
0.000,	0.007,	0.513,	0.000,	1.653,	2.707,
0.060,					
1.028,	0.012,	0.647,	0.018,	5.972,	3.030,
0.267,	0.002,	0.000,	0.022,	0.000,	0.000,
0.000,	0.000,	0.000,	0.018,	0.000,	0.000,
0.268,	0.000,	0.000,	0.177,	0.033,	1.052,
7.488,	1.925,	0.013,	0.000,	0.000,	0.000,
0.000,					
0.518,	0.003,	1.477,	0.020,	0.662,	0.180,
0.000,	0.042,	0.015,	0.000,	0.000,	0.000,
0.422,	0.017,	1.867,	0.037,	0.000,	0.000,
0.000,	0.000,	0.002,	0.000,	0.000,	0.000,
0.000,	0.000,	0.000,	0.000,	0.000,	0.000,
0.038,	0.000,	0.177,	0.277,	0.782,	2.327,
0.013,	0.072,	0.000,	0.038,	0.343,	0.002,
0.715,	0.122,	0.150,	0.000,	0.125,	0.102,
0.115,	0.000,	0.000,	0.747,	0.797,	0.270,
0.000,	0.000,	0.000,	0.000,	0.000,	0.000,
0.000,					
0.000,	0.000,	0.000,	0.000,	0.000,	0.000,
0.045,	1.208,	2.103,	0.007,	0.000,	0.502,
1.522,	0.022,	0.468,	0.308,	1.347,	0.650,
0.002,	0.000,	0.000,	0.000,	0.000,	0.052,
0.072,	0.250,	0.238,	0.313,	0.002,	0.000,
0.000,	0.000,	0.000,	0.000,	0.000,	0.005,
0.037,	0.778,	0.135,	0.763,	0.457,	0.113,
0.003,	0.005,	0.348,	0.530,	2.005,	0.172,
0.000,	0.192,	0.255,	0.000,	0.022,	0.000,
0.010,	0.000,	0.017,	0.387,	0.143,	0.000,
0.000,					
0.380,	0.020,	0.000,	0.052,	1.742,	1.197,
0.090,	2.020,	0.502,	0.107,	0.008,	0.038,
0.000,	0.000,	0.000,	0.000,	0.000,	0.000,
0.000,	0.000,	0.000,	0.002,	0.163,	0.012,
0.000,	0.000,	0.218,	0.037,	5.065,	0.590,
0.418,					
0.002,	0.000,	0.000,	0.000,	0.000,	0.005,
0.000,	0.005,	0.003,	0.000,	0.000,	0.000,

	0.000,	0.002,	0.055,	0.013,	0.002,	0.007,
	0.163,	0.078,	0.000,	0.032,	0.022,	0.047,
	0.032,	0.000,	0.000,	0.002,		
	0.073,	0.575,	0.000,	0.448,	0.035,	0.000,
	0.040,	0.020,	0.003,	0.443,	0.945,	0.305,
	0.410,	0.000,	0.002,	0.000,	0.855,	0.425,
	0.070,	0.000,	0.040,	0.102,	0.068,	0.002,
	0.000,	0.000,	0.027,	0.020,	0.052,	0.525,
	0.222,					
TMAX =	10.900,	9.800,	11.700,	11.100,	9.100,	7.300,
	8.700,	7.100,	7.500,	2.600,	5.200,	-0.900,
	7.000,	4.700,	1.000,	2.400,	4.600,	7.000,
	9.900,	12.300,	11.000,	9.400,	9.100,	3.000,
	9.900,	6.800,	7.900,	0.600,	-0.100,	3.700,
	9.200,	6.500,	2.600,	7.700,	9.600,	11.900,
	9.700,	4.400,	6.700,	8.700,	11.400,	10.700,
	9.700,	13.900,	14.300,	15.000,	16.500,	13.100,
	15.400,	9.400,	11.900,	8.300,	11.100,	14.800,
	16.600,	18.400,	17.600,	14.200,	12.100,	15.400,
	17.900,					
	17.900,	16.900,	18.800,	18.800,	17.100,	19.300,
	11.600,	9.700,	9.400,	10.400,	8.700,	12.900,
	12.500,	16.900,	9.700,	13.500,	8.100,	10.400,
	12.400,	8.700,	15.400,	9.100,	11.900,	12.100,
	12.300,	15.400,	12.800,	14.400,	17.000,	19.800,
	16.700,	14.100,	22.000,	23.200,	15.600,	15.200,
	18.200,	19.100,	18.500,	16.500,	18.700,	20.800,
	22.300,	24.600,	21.400,	14.900,	19.200,	21.200,
	20.700,	19.300,	15.200,	19.800,	23.100,	23.000,
	24.100,	25.300,	21.700,	22.300,	20.400,	15.000,
	12.800,					
	15.600,	16.200,	19.000,	15.900,	21.000,	9.500,
	7.400,	14.500,	19.200,	19.200,	19.500,	21.900,
	23.100,	23.700,	23.700,	18.700,	13.900,	16.300,
	20.400,	19.200,	22.700,	23.200,	20.100,	21.100,
	11.500,	5.300,	8.100,	13.500,	15.600,	18.400,
	20.000,					
	16.400,	18.000,	15.900,	11.800,	17.400,	11.300,
	12.700,	14.200,	11.700,	14.900,	19.300,	19.000,
	18.300,	14.400,	14.700,	9.200,	15.600,	20.700,
	20.400,	18.600,	18.900,	18.700,	20.300,	19.100,
	18.100,	18.100,	18.700,	17.400,	18.300,	18.500,
	9.683,	12.750,	13.567,	10.950,	5.833,	3.817,
	6.217,	7.217,	4.900,	6.350,	7.200,	7.200,
	11.033,	10.950,	4.317,	6.783,	7.803,	10.350,
	9.833,	13.517,	14.150,	10.800,	7.950,	5.267,
	5.217,	8.683,	10.183,	11.000,	12.267,	12.633,
	12.350,					
	13.450,	11.750,	12.133,	8.883,	8.017,	7.867,
	7.017,	8.817,	6.433,	6.550,	7.900,	9.350,
	6.350,	0.267,	-1.700,	-1.400,	-2.467,	0.500,
	3.433,	2.400,	5.967,	6.567,	6.733,	6.667,
	6.683,	5.883,	6.317,	1.417,	-0.317,	1.967,
	3.200,	5.267,	4.383,	4.900,	5.100,	5.117,

TMIN =

5.650,	7.500,	4.733,	6.317,	-2.700,	-2.033,
-1.583,	-2.417,	2.117,	4.850,	5.950,	-1.567,
-3.333,	2.800,	0.483,	-5.267,	-6.717,	-4.833,
-2.567,	-0.717,	0.250,	0.417,	-3.667,	-3.017,
1.733,					
1.367,	1.433,	7.183,	5.733,	2.800,	0.633,
-6.267,	-0.833,	3.383,	1.433,	2.333,	1.150,
0.417,	2.550,	5.617,	5.500,	5.283,	3.733,
2.783,	2.017,	1.100,	-0.450,	-2.800,	-3.900,
-3.833,	0.617,	-1.333,	-2.667,	-2.633,	1.383,
0.683,					
-0.250,	0.050,	0.100,	1.733,	3.250,	2.633,
4.600,	3.867,	1.567,	7.800,	7.200,	5.517,
5.300,	2.567,	0.200,	2.383,	5.033,	5.567,
0.267,	1.117,	-1.617,	-4.217,	-7.183,	-5.833,
-6.150,	-6.333,	0.217,	4.650,		
6.950,	0.700,	4.433,	4.067,	-1.383,	-3.783,
1.067,	1.850,	2.267,	1.700,	-1.117,	0.850,
-1.667,	-1.033,	4.617,	4.117,	3.483,	-2.083,
-0.533,	0.867,	-0.017,	-0.417,	-1.067,	3.133,
6.250,	8.000,	9.450,	6.317,	6.483,	4.833,
4.883,					
-1.700,	0.100,	-1.200,	2.000,	2.500,	-0.900,
-3.400,	1.100,	-0.200,	-2.200,	-4.200,	-4.900,
-6.400,	-4.400,	-4.200,	-3.200,	-5.900,	-5.900,
-2.100,	0.500,	1.600,	2.600,	2.000,	-3.500,
-4.700,	-2.100,	-2.200,	-6.600,	-6.900,	-3.500,
-0.400,	-2.000,	-4.200,	-3.900,	0.300,	1.400,
1.200,	-0.600,	0.600,	1.500,	2.100,	4.200,
3.300,	3.800,	3.000,	4.300,	3.800,	5.100,
3.300,	4.800,	4.500,	2.100,	1.700,	1.800,
5.700,	7.000,	8.400,	6.900,	6.200,	6.100,
6.800,					
5.500,	5.600,	6.000,	8.500,	9.400,	8.300,
6.500,	1.200,	-0.400,	1.600,	1.100,	1.400,
4.400,	3.300,	2.800,	0.600,	2.200,	1.200,
3.500,	3.300,	2.900,	4.700,	3.300,	4.000,
4.100,	4.000,	5.700,	4.400,	5.000,	6.200,
8.600,	7.200,	7.000,	11.200,	9.800,	8.900,
9.500,	9.100,	7.300,	7.700,	6.100,	8.500,
9.600,	12.100,	11.700,	9.600,	8.400,	9.700,
11.100,	10.400,	5.800,	5.000,	8.500,	9.600,
11.000,	11.800,	11.500,	10.900,	10.100,	7.700,
5.200,					
5.100,	6.700,	7.900,	8.000,	9.300,	3.400,
2.100,	1.300,	5.200,	8.900,	8.500,	9.900,
10.500,	10.700,	10.400,	9.500,	6.900,	5.300,
7.700,	9.200,	8.700,	10.200,	9.300,	11.500,
4.300,	2.300,	1.600,	0.400,	2.600,	5.200,
6.800,					
9.600,	8.100,	8.400,	4.500,	5.600,	3.900,
1.300,	2.800,	4.100,	2.100,	5.400,	7.100,
6.000,	7.200,	4.400,	2.600,	4.700,	6.700,
8.300,	7.700,	7.900,	7.900,	7.400,	7.800,
7.300,	6.500,	7.100,	6.700,	6.200,	6.300,

3.800,	3.533,	3.467,	5.750,	2.567,	-1.150,
-1.350,	-0.783,	0.217,	-0.050,	-0.500,	0.517,
2.833,	2.383,	0.033,	-1.983,	1.167,	3.233,
4.150,	2.617,	3.850,	4.100,	4.050,	2.600,
1.250,	-0.550,	-0.383,	1.000,	1.867,	2.600,
2.350,					
2.067,	3.483,	2.217,	0.333,	-1.233,	-0.667,
-0.367,	3.767,	2.500,	1.600,	0.250,	1.517,
0.217,	-5.083,	-5.767,	-6.250,	-5.933,	-4.917,
-3.017,	-4.583,	-4.200,	-0.683,	-0.500,	0.317,
-0.183,	0.800,	1.650,	-1.483,	-2.200,	-3.167,
-2.933,	-1.800,	-0.350,	-2.500,	-2.667,	-0.450,
-0.067,	1.700,	-0.167,	-2.433,	-7.083,	-7.583,
-6.433,	-7.833,	-8.867,	-1.733,	-0.200,	-8.133,
-11.917,	-8.350,	-8.283,	-11.150,	-10.867,	-11.250,
-11.050,	-7.717,	-6.517,	-6.017,	-11.433,	-12.417,
-7.067,					
-2.467,	-6.017,	-3.233,	-0.900,	-1.483,	-3.933,
-13.500,	-12.767,	-3.083,	-2.883,	-2.150,	-3.533,
-5.350,	-4.700,	-0.550,	-1.150,	-3.400,	-4.583,
-4.683,	-5.417,	-6.983,	-6.967,	-7.433,	-8.117,
-10.667,	-11.017,	-5.150,	-6.583,	-6.650,	-3.867,
-3.367,					
-7.667,	-9.867,	-10.867,	-9.467,	-7.550,	-5.700,
-3.067,	-4.117,	-5.300,	-3.983,	-2.050,	-4.017,
-2.317,	-5.400,	-4.150,	-4.517,	-0.950,	-3.583,
-4.183,	-5.583,	-9.450,	-12.583,	-11.483,	-13.733,
-15.500,	-13.967,	-13.583,	-8.167,		
-3.567,	-4.967,	-6.933,	-4.183,	-6.233,	-9.883,
-10.567,	-4.567,	-5.617,	-7.000,	-6.883,	-9.033,
-6.850,	-10.617,	-10.000,	-4.617,	-4.067,	-5.033,
-7.433,	-7.117,	-6.950,	-4.800,	-5.283,	-9.000,
-7.150,	-3.783,	-1.500,	-0.033,	-2.850,	-1.500,
-1.750,					

TCRIT=30*3.0, 31*3.0, 15*3.0, 15*2.0, 31*0.75, 31*0.75, 30*0.75, 182*3.0,

&=END

&BASE

8ASIN = 'FELSBERG VR/HR/LW-AL ',

NZ=5,

IYEAR=1985,

AREA=2.6217E8, 5.2349E8, 8.9156E8, 1.16009E9, 4.3516E8,

X=1.07D0,

Y=-0.029D0,

QNS=25.0D0,

PDR=367*1.0,

PDM2=367*0.0,

DTLR=2928*0.65,

AN=30*0.45, 31*0.5, 30*0.55, 31*0.55, 31*0.55, 30*0.55, 123*0.25,

59*0.3, 0.0,

30*0.45, 31*0.5, 30*0.55, 31*0.55, 31*0.55, 30*0.55, 123*0.25,

59*0.3, 0.0,

30*0.4, 31*0.45, 30*0.5, 31*0.55, 31*0.55, 30*0.6, 123*0.25,

59*0.3, 0.0,

30*0.4, 31*0.45, 30*0.5, 31*0.55, 31*0.55, 30*0.6, 123*0.25,

59*0.3, 0.0,

30*0.4, 31*0.45, 30*0.5, 31*0.55, 31*0.55, 30*0.6, 123*0.25,

59*0.3, 0.0,

```

CS=30*0.8, 31*0.7, 30*0.7, 31*0.7, 31*0.7, 30*0.8, 123*0.8,
59*0.8, 0.0,
30*0.8, 31*0.7, 30*0.7, 31*0.7, 31*0.7, 30*0.8, 123*0.8,
59*0.8, 0.0,
30*0.9, 15*0.9, 16*0.8, 30*0.8, 31*0.8, 31*0.8, 30*0.8, 123*0.9.
59*0.9, 0.0,
30*0.9, 15*0.9, 16*0.8, 30*0.8, 31*0.8, 31*0.8, 30*0.8, 123*0.9
59*0.9, 0.0,
30*0.9, 15*0.9, 16*0.8, 30*0.8, 31*0.8, 31*0.8, 30*0.8, 123*0.9
59*0.9, 0.0,
CR=30*0.9, 31*0.6, 30*0.6, 31*0.6, 31*0.6, 30*0.6, 123*0.5,
59*0.6, 0.0,
30*0.9, 31*0.6, 30*0.6, 31*0.6, 31*0.6, 30*0.6, 123*0.5,
59*0.6, 0.0,
30*0.9, 31*0.9, 15*0.9, 15*0.6, 31*0.6, 31*0.6, 30*0.6, 123*0.5.
59*0.6, 0.0,
30*0.9, 31*0.9, 15*0.9, 15*0.6, 31*0.6, 31*0.6, 30*0.6, 123*0.5
59*0.6, 0.0,
30*0.9, 31*0.9, 15*0.9, 15*0.6, 31*0.6, 31*0.6, 30*0.6, 123*0.5
59*0.6, 0.0,
ZMEAN=900., 1400., 1880., 2360., 2750.,
STATN=1523.,
MAXMIN=1,
IEXT=1,
IDEGDY=1,
IPR=30*0, 31*1, 30*1, 31*1, 31*1, 30*1, 123*0, 60*0,
30*0, 31*1, 30*1, 31*1, 31*1, 30*1, 123*0, 60*0,
30*0, 31*0, 15*0, 15*1, 31*1, 31*1, 30*1, 123*0, 60*0,
30*0, 31*0, 15*0, 15*1, 31*1, 31*1, 30*1, 123*0, 60*0,
30*0, 31*0, 15*0, 15*1, 31*1, 31*1, 30*1, 123*0, 60*0,
&END
&OPT
IRUN=1,
MODE=0,
IPLT=0,
IPRINT=1,
UFLAG=0,
ACTFLG=1,
IZONE=0,0,1,
IDTFLG=1,
MTHD=0,
ITPROC=1,
IPRRUN=1,
ISTMTH=4,
IENMTH=9,
&END

```

CURRICULUM VITAE

Name, Vorname: BAUMGARTNER, Michael Franz
Bürgerort: Solothurn und Oensingen
Geboren: 30. Dezember 1953 in Solothurn

Schul- und Weiterbildung:

1961 - 1967	Primarschule	Solothurn		
1967 - 1975	Gymnasium	Solothurn	math./nat.wiss.	C-Matur
1976 - 1979	ETH	Zürich	Vermessung	
1979 - 1983	Universität	Zürich	Geographie	Diplom

Während dem Geographiestudium spezialisierte ich mich in Fernerkundung (digitale Satellitenbildverarbeitung) und Kartographie (Prof. E. Spiess, ETHZ). Im Sommer 1983 erwarb ich das Diplom für Naturwissenschaftler mit Hauptfach Geographie (Nebenfächer: Geobotanik, Geologie, Mathematik, Kartographie). Die Diplomarbeit unter dem Titel "Klassifikation des städtisch bebauten Zürich mit einem multitemporalen Landsat-MSS Datensatz" wurde von Herrn Prof. Dr. Klaus I. Itten betreut. Seit Juli 1983 arbeitete ich an der Dissertation im Rahmen eines interdisziplinären Nationalfonds-Projektes am Institut für Kommunikationstechnik der ETHZ. Die Dissertation mit dem Titel "Schneeschmelz-Abflussimulationen basierend auf Schneeflächenbestimmungen mit digitalen Landsat-MSS- und NOAA/AVHRR-Daten" wurde von Herrn Prof. Dr. Harold Haefner und Herrn Prof. Dr. Klaus I. Itten, Geographisches Institut der Universität Zürich, geleitet.

Bei den folgenden Dozenten besuchte ich Vorlesungen und Uebungen:

Geographie:	Bär, Bögli, Brassel, Brugger, Dürst, Egli, Elsasser, Graf, Fitze, Flütsch, Furrer, Gensler, Gutermann, Guyan, Haefner, Itten, Kishimoto, Leemann, Lichtenegger, Schweingruber, Steiner, Tanner, Trachsler
Geobotanik:	Landolt
Mathematik:	Stammbach, Storrer
Geologie:	Gansser, Hantke, Hsu, Lowrie, Milnes, Ramsey, Trümpy
Kartographie:	Spiess
Vermessung:	Chaperon, Elmiger
Astronomie:	Celenka, Waldmeier
Bildwissenschaft:	Kübler, Seidel

